



# **Caracterización de la tipología y cinemática del deslizamiento de la urbanización Triguales Altos, Cuenca, a partir de fotografías aéreas, estación total, escáner láser terrestre y ensayos geotécnicos del suelo**

Trabajo de titulación previo a  
la obtención del título de  
Ingeniero Civil

Universidad de Cuenca | Facultad de Ingeniería

Autor: Irwin Rashid Samaniego Placencia Ci: 010460365-9  
Director: Ing. Enrique Alfredo Acosta Arias, PhD. Ci: 175478335-3

Mayo 2018



## RESUMEN

Los deslizamientos causan severos daños económicos y sociales alrededor del mundo cuando se presentan en zonas pobladas. Por tal motivo, su análisis ha ido cobrando gran importancia a lo largo del tiempo. Con el avance de la tecnología, se han desarrollado programas informáticos capaces de ejecutar en milisegundos los procesos de análisis de estabilidad más complejos como los métodos de Bishop y Fellenius, los cuales nos permiten estimar el Factor de Seguridad (FS) de una ladera o talud. Estos se complementan con el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que aportan información útil a este tipo de estudios y con precisiones muy altas. El presente trabajo, realizado en la Urbanización Los Trigales Altos, al Noreste de la ciudad de Cuenca, Ecuador, recolectó información mediante Escáner Láser Terrestre (TLS) para generar un modelo tridimensional de puntos en 3 fechas distintas, lo que permitió analizar la cinética del deslizamiento que afecta a la urbanización. Adicionalmente, se realizó la caracterización física y mecánica del suelo, encontrando que el suelo de la zona de estudio contiene arcillas muy expansivas, que también afectan a las viviendas ubicadas sobre el deslizamiento. El análisis del modelo tridimensional de la nube de puntos ha revelado que el máximo desplazamiento vertical del deslizamiento se ha producido en su parte media con un máximo de 30 cm ladera abajo durante los 7 meses que trascurrieron entre el primer y último levantamiento con TLS. Basándonos en la ortofoto del año 2010 y la información catastral del Municipio de Cuenca del año 2000, el desplazamiento en este mismo sector sería de 3 m en 17 años. El factor de seguridad en condiciones normales de humedad FS es 0,6, y con aceleración sísmica FS es 0,5. Se concluye que la ladera es inestable y que el deslizamiento se encuentra activo, evidenciándose incluso edificaciones al borde del colapso.

## PALABRAS CLAVE:

Deslizamiento, análisis de estabilidad, Factor de Seguridad, Sistemas de Información Geográfica, Escáner Laser Terrestre, modelo tridimensional de puntos, arcillas expansivas.





## **ABSTRACT**

Landslides cause severe economic and social damage in inhabited areas around the world, which is why landslide analysis has gained importance in time. Technological improvements have allowed to develop software powerful enough to perform complex stability analyses in milliseconds, like Bishop and Fellenius methods for estimating the Safety Factor (SF) for a hillside or battered terrain. This software is often paired with Geographic Information Systems (GIS), to increase information for high precision studies. The present research took place at the northeast of Cuenca, Ecuador, on a housing estate called “Trigales Altos”, and used Terrestrial Laser Scanning (TLS) to collect data to generate a tridimensional point model in three different moments. This allowed to analyze the kinetics of slide affecting the housing estate. Additionally, characterizations of the soil, both physical and mechanical, showed a terrain composed by highly expansive clay, which also affect households located over the landslide. The tridimensional point cloud analysis revealed that the maximum vertical displacement of the slide was 30 cm, produced in the middle, down the hillside, during seven months, between the first and the last TLS survey. Based on the 2010 ortophoto and data from the 2000 municipal cadaster, the displacement in this area would reach 3 m in 17 years. The safety factor (SF) under normal humidity conditions is 0,6 and considering ground acceleration, the SF is 0,5. The study concludes showing the instability of the hillside and the active slide, with edifications about to collapse.

## **KEY WORDS:**

Landslides, stability analyses, Safety Factor, Geographic Information Systems, Terrestrial Laser Scanning, tridimensional point model, expansive clay.



## Contenido

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	3
Capítulo 1 Introducción .....	19
1.1. Introducción y justificación .....	19
1.2. Objetivos.....	20
1.2.1. Objetivo general .....	20
1.2.2. Objetivos específicos: .....	20
Capítulo 2 Marco teórico .....	20
2.1. Movimientos de ladera.....	20
2.1.1. Clasificación de movimientos de ladera .....	21
2.1.1.1. Derrumbes y caída de bloques .....	23
2.1.1.2. Avalanchas de rocas / de detritos .....	23
2.1.1.3. Volcamiento o basculamiento .....	23
2.1.1.4. Reptación de suelos .....	24
2.1.1.5. Deslizamientos .....	25
2.1.1.6. Coladas o flujos .....	26
2.1.2. Deslizamiento.....	27
2.1.3. Partes de un deslizamiento .....	28
2.2. Exploración de subsuelo.....	29
2.2.1. Métodos indirectos .....	30
2.2.1.1. MASW. ....	30
2.2.1.2. ReMi. ....	31
2.2.1.3. ESAC.....	31
2.2.2. Métodos directos.....	31
2.2.2.1. Calicatas y pozos.....	32





---

2.3. Ensayos geotécnicos para la determinación de parámetros físicos y mecánicos de suelo. ....	32
2.3.1. Ensayos geotécnicos in-situ .....	32
2.3.1.1. SPT (Standard Penetration Test).....	32
2.3.2. Ensayos geotécnicos laboratorio .....	34
2.3.2.1. Límite de consistencia o límites de Atterberg .....	34
2.3.2.2. Clasificación de suelos .....	36
2.3.2.3. Ensayo triaxial consolidado- no drenado con medición de presión de poro en muestras compactada y saturadas .....	38
2.3.2.4. Ensayo corte directo .....	38
2.4. Estabilidad de laderas y taludes. ....	39
2.4.1. Métodos de análisis de estabilidad de laderas y taludes.....	41
2.4.1.1. Método de Fellenius .....	45
2.4.1.2. Método de Bishop simplificado .....	45
2.5. Escáner láser terrestre.....	46
Capítulo 3 Materiales .....	47
3.1. Zona de estudio. ....	47
3.1.1. Situación geográfica.....	47
3.1.2. Hidrografía. ....	48
3.1.3. Clima .....	49
3.1.4. Geología regional .....	49
3.1.4.1. Formaciones del Terciario .....	50
3.1.4.2. Formaciones del Cuaternario.....	53
3.1.5. Geología local .....	57
3.1.5.1. Formación Santa Rosa .....	57
3.1.5.2. Terraza glacial (5) .....	58
3.1.5.3. Deposito Coluvial.....	58



---

3.1.5.4. Suelo Orgánico .....	59
3.1.6. Geomorfología .....	60
3.1.7. Sismicidad.....	63
3.1.8. Hidrogeología.....	65
3.1.9. Acciones antrópicas. ....	66
3.1.10. Edificaciones en mal estado.....	66
3.1.11. Modelo digital de terreno y ortofoto.....	67
3.2. Estación total .....	68
3.3. Escáner láser terrestre.....	69
3.4. ArcGIS .....	70
3.5. AutoCAD Civil 3D 2017.....	71
3.6. ArchiCAD .....	71
3.7. Rocscience - Slide 5.00. ....	71
3.8. Scene.....	71
3.9. CloudCompare.....	72
3.10. Hardware .....	73
Capítulo 4 Métodos. ....	73
4.1. Análisis tridimensional de nubes de puntos. ....	73
4.1.1. Levantamiento de nubes de puntos .....	74
4.1.1.1. Primer levantamiento.....	77
4.1.1.2. Segundo levantamiento. ....	77
4.1.1.3. Tercer levantamiento. ....	78
4.1.2. Registro o unión de escaneos.....	80
4.1.2.1. Registro con Scene 5.5.0.44203.....	80
4.1.2.2. Registro con ReCap 360 .....	82
4.1.3. Edición de levantamientos. ....	83





---

4.1.3.1. Disminución de la densidad de puntos .....	83
4.1.3.2. Eliminación de ruido .....	84
4.1.3.3. Edición de puntos fuera de la zona de interés. ....	86
4.1.4. Alineación de levantamientos.....	88
4.1.5. Extracción de secciones de nubes a lo largo de perfiles a analizar	88
4.1.6. Representación gráfica para el análisis de los perfiles.....	89
4.1.7. Creación de modelo BIM a partir de nube de puntos. ....	89
4.1.7.1. Construcción edificaciones .....	90
4.2. Caracterización física y mecánica de los suelos.....	93
4.2.1. Granulometría por cribado .....	95
4.2.2. Límite de consistencia o límites de Atterberg .....	95
4.2.2.1. Límite Líquido, LL. ....	95
4.2.2.2. Límite Plástico, LP. ....	97
4.2.3. Ensayo corte directo.....	97
4.2.4. Ensayos MASW, ESAC Y REMI .....	99
4.3. Creación del perfil geológico de la ladera. ....	101
4.3.1. Perfil topográfico .....	101
4.3.1.1. Creación de la superficie a partir de nube de puntos.....	101
4.3.1.2. Creación del alineamiento .....	102
4.3.1.3. Creación del perfil del terreno.....	102
4.3.2. Estratigrafía.....	103
4.4. Análisis del Factor de Seguridad (F.S.). ....	104
Capítulo 5 Resultados y discusión .....	105
5.1. Geometría de la zona de estudio.....	105
5.2. Análisis y comparación gráfica de las deformaciones de los edificios.	106
5.2.1. Perfil A-A' .....	106



---

5.2.2. Perfil B-B' .....	115
5.2.2.1. Analisis de edificacion BIM dentro del perfil B-B' .....	123
5.2.3. Perfil C-C' .....	129
5.2.4. Perfil D-D' .....	137
5.2.5. Posibles superficies de falla en base a la información obtenida. ..	145
5.3. Delimitación del deslizamiento.....	147
5.4. Propiedades físicas y mecánicas del suelo .....	148
5.4.1. Propiedades físicas y mecánicas del suelo.....	148
5.4.2. Tomografía sísmica.....	150
5.5. Factor de Seguridad en condiciones secas, húmedas y con aceleración sísmica.....	153
Capítulo 6 Conclusiones y recomendaciones.....	157
Capítulo 7 Referencias bibliográficas .....	159
Anexos	
Anexo 1 Ortofoto y MDT (Sigtierras, 2010). .....	165
Anexo 2 Par estereoscópico fotografías aéreas 1963.....	166
Anexo 3 Par estereoscópico fotografías aéreas 1977.....	168
Anexo 4 Par estereoscópico fotografías aéreas 1989.....	170
Anexo 5 Par estereoscópico fotografías aéreas 2008.....	172
Anexo 6 Anáglifos creados a partir de pares estereoscópicos.....	174
Anexo 7 Ortofotos generadas a partir de la nube de puntos del TLS.....	177
Anexo 8 Planos Edificación 1.....	180
Anexo 9 Planos Edificación 2.....	183
Anexo 10 Distribución perforaciones en de la zona de estudio.....	185
Anexo 11 Registros del sondeo Sta1 de exploración ejecutados durante el programa de exploraciones de campo. Tecnosuelos (2016).....	186
Anexo 12 Registros del sondeo Sta3 de exploración ejecutados durante el programa de exploraciones de campo. Tecnosuelos (2016).....	188





---

Anexo 13 Registros del sondeo Sta3 B de exploración ejecutados durante el programa de exploraciones de campo. Tecnosuelos (2016).....	190
Anexo 14 Registro fotográfico casa sin afecciones dentro de la zona afectada en la urbanización Trigales Altos.....	193



## Lista de Figuras

Figura 2-1 Tipos de movimiento de ladera (J. Hutchinson, 1988; Varnes, 1978). .....	22
Figura 2-2 Partes de un deslizamiento, tomada de Suárez (2009). ....	29
Figura 2-3 Esquema del ensayo de penetración estándar (SPT) (Devincenzi & Frank, 2004). ....	33
Figura 2-4 Cuchara de Casagrande. ....	35
Figura 2-5 Ensayo para la determinación de límite líquido por medio de la cuchara de Casagrande. ....	35
Figura 2-6 Máquina de Compresión Triaxial. ....	38
Figura 2-7 Máquina corte directo del laboratorio de suelos de la Universidad de Cuenca. ....	39
Figura 2-8 Recta intrínseca. ....	39
Figura 2-9 Círculo de falla de radio R y las fuerzas que actúan sobre una dovela (Armas & Horta, 1987). ....	41
Figura 2-10 Polígono de fuerzas actuantes en una dovela, para $\beta$ conocido. (Armas & Horta, 1987). ....	43
Figura 3-1 Situación geográfica de la zona de estudio. ....	48
Figura 3-2 Hidrografía del área de estudio. ....	48
Figura 3-3 Tipos de clima de la provincia del Azuay. ....	49
Figura 3-4 Geología regional de la zona de estudio. ....	56
Figura 3-5 Geología local, Trigales Altos. ....	60
Figura 3-6 Fotografías aéreas de la zona de estudio ....	61
Figura 3-7 Mapa de pendientes. ....	62
Figura 3-8 Zona inferior del área de estudio, troncos verticales de árboles de la zona baja y alta. ....	62
Figura 3-9 Izquierda: ortofoto (Sigtierras, 2010). Derecha: imagen satelital (Google, 2017) ....	63
Figura 3-10 Mapa de máximas intensidades sísmicas del Ecuador (Singaicho, 2009). ....	64
Figura 3-11 Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z. ....	65





Figura 3-12 Muestra de suelo extraídas parte baja de la zona de estudio. ....	66
Figura 3-13 Edificaciones en mal estado parte media de la zona de estudio...	67
Figura 3-14 Edificación con agrietamiento habitada en la parte media del deslizamiento. ....	67
Figura 3-15 Estación total, espejo y trípode. ....	68
Figura 3-16 Principio de medición basado en la fase. ....	69
Figura 3-17 levantamiento en la zona de interés con el escáner FARO Focus3D X130. ....	70
Figura 4-1 Configuración de calidad y resolución del escaneo. ....	75
Figura 4-2 Hitos para monitoreo. ....	75
Figura 4-3 Ubicación de los escaneos con LTS realizados en el primer levantamiento (diciembre de 2016). ....	77
Figura 4-4 Ubicación de los escaneos con LTS realizados en el segundo levantamiento (Junio de 2017). ....	78
Figura 4-5 Ubicación de los escaneos con LTS realizados en el tercer levantamiento (Julio de 2017). ....	79
Figura 4-6 Desbrozado de la vegetación. ....	79
Figura 4-7 Ejemplo de eliminación de ruido en modelo tridimensional de puntos, vista en perspectiva. ....	85
Figura 4-8 Ejemplo de eliminación de datos fuera de la zona de estudio, vista en perspectiva. ....	87
Figura 4-9 Distribución hitos de monitoreo en de la zona de estudio. ....	88
Figura 4-10 Perfiles para la extracción de nubes. ....	89
Figura 4-11 Fotografía, nube de puntos y modelo BIM – Edificación 1. ....	91
Figura 4-12 Figura 4 10 Fotografía, nube de puntos y modelo BIM – Edificación 2. ....	92
Figura 4-13 Mapa de sitio del lugar de extracción de muestras. ....	93
Figura 4-14 Cuadro resumen muestra 1: sitio, afloramiento, preparación de la muestras y muestras después de los ensayos. ....	93
Figura 4-15 Cuadro resumen muestra 2: sitio, afloramiento, preparación de la muestras y muestras después de los ensayos. ....	94
Figura 4-16 Configuración y ejecución de ensayos geofísicos. ....	100
Figura 4-17 Vista en perspectiva del terreno del levantamiento 3. ....	101



Figura 5-1 MDT generada a partir de la nube de puntos del LÍDAR terrestre del levantamiento 3 .....	105
Figura 5-2 Alineamiento para el perfil de terreno y curvas de nivel.....	106
Figura 5-3 Perfil MDT SIGTIERRAS VS perfil MDT generada a partir de la nube de puntos del LÍDAR terrestre del levantamiento 3. ....	106
Figura 5-4 Alineamiento del perfil A-A' – Ortofoto creada a partir de la nube de puntos del LÍDAR terrestre.....	108
Figura 5-5 Perfil A-A' primer levantamiento.....	109
Figura 5-6 Perfil A-A' segundo levantamiento. ....	110
Figura 5-7 Perfil A-A' tercer levantamiento.....	111
Figura 5-8 Levantamiento 1 vs levantamiento 2, perfil A-A'. ....	112
Figura 5-9 Levantamiento 1 vs levantamiento 3, perfil A-A'. ....	113
Figura 5-10 Levantamiento 2 vs levantamiento 3, perfil A-A'. ....	114
Figura 5-11 Alineamiento perfil B.B' – Ortofoto generada a partir de la nube de puntos del LÍDAR terrestre.....	116
Figura 5-12 Perfil B-B' levantamiento 1.....	117
Figura 5-13 Perfil B-B' levantamiento 2.....	118
Figura 5-14 Perfil B-B' levantamiento 3.....	119
Figura 5-15 Levantamiento 1 vs levantamiento 2, perfil B-B'. ....	120
Figura 5-16 Levantamiento 1 vs levantamiento 3, perfil B-B' en metros.....	121
Figura 5-17 Levantamiento 2 vs levantamiento 3, perfil B-B'. ....	122
Figura 5-18 Nube de puntos edificación 1 - Vista lateral modelo BIM.....	123
Figura 5-19 Modelo BIM vs Levantamiento 3 – Vista lateral ,Edificación 1... ..	124
Figura 5-20 Modelo BIM vs Levantamiento 3 – Vista superior ,Edificación 1. ....	125
Figura 5-21 Nube de puntos edificación 2 - Vista lateral modelo BIM.....	126
Figura 5-22 Modelo BIM vs Levantamiento 3 – Vista lateral ,Edificación 2. ...	127
Figura 5-23 Modelo BIM vs Levantamiento 3 – Vista superior ,Edificación 2. ....	128
Figura 5-24 Alineamiento perfil C-C' – Ortofoto generada a partir de la nube de puntos del LÍDAR terrestre.....	130
Figura 5-25 Perfil C-C' levantamiento 1.....	131
Figura 5-26 Perfil C-C' levantamiento 2.....	132
Figura 5-27 Perfil C-C' levantamiento 3.....	133
Figura 5-28 Levantamiento 1 vs levantamiento 2, perfil C-C'. ....	134



---

Figura 5-29 Levantamiento 1 vs levantamiento 3, perfil C-C'.....	135
Figura 5-30 Levantamiento 2 vs levantamiento 3, perfil C-C'.....	136
Figura 5-31 Alineamiento perfil D-D' – Ortofoto generada a partir de la nube de puntos del LÍDAR terrestre.....	138
Figura 5-32 Perfil D-D' levantamiento 1.....	139
Figura 5-33 Perfil D-D' levantamiento 2.....	140
Figura 5-34 Perfil D-D' levantamiento 3.....	141
Figura 5-35 Levantamiento 1 vs levantamiento 2, perfil D-D'.....	142
Figura 5-36 Levantamiento 1 vs levantamiento 3, perfil D-D'.....	143
Figura 5-37 Levantamiento 2 vs levantamiento 3, perfil D-D'.....	144
Figura 5-38 Esquema de posibles superficies de falla en el deslizamiento de la urbanización “Trigales Altos”.....	146
Figura 5-39 Escarpe principal del deslizamiento en el año 2015 y año 2017.	147
Figura 5-40 Delimitación y vectores de movimiento del deslizamiento.<< .....	148
Figura 5-41 Alineación ensayos sísmicos. ....	151
Figura 5-42 Tomografía sísmica, modelo de velocidad de ondas p, línea 1. .	152
Figura 5-43 Tomografía sísmica, modelo de velocidad de ondas p línea 2. ..	152
Figura 5-44 F.S. de la ladera en condiciones normales de humedad (F.S. = 0.6). .....	154
Figura 5-45 Superficies de falla de la ladera en condiciones normales de humedad. ....	155
Figura 5-46 F.S. de la ladera en condiciones normales de humedad con aceleración sísmica $K_h = 0,125$ y $K_v = 0,0625$ (F.S. = 0,5).....	156
Figura 5-47 Superficies de falla de la ladera en condiciones normales de humedad con aceleración sísmica $K_h = 0,125$ y $K_v = 0,0625$ .....	157



---

## Lista de tablas

Tabla 2-1 Clasificación del suelo por el tamaño de las partículas. Fuente: Braja Das, 1983. ....	36
Tabla 2-2 Clasificación de los suelos por el método SUCS. Fuente: Braja Das, 1983. ....	37
Tabla 2-3 Incógnitas asociadas al equilibrio de fuerzas y momentos para las “n” dovelas (Armas & Horta, 1987). ....	42
Tabla 3-1 Parámetros físico-mecánicos miembro Santa Rosa (Mr) (Basabe, P., et al., 1998). ....	51
Tabla 3-2 Parámetros físico-mecánicos de la formación Mangán (Basabe, P., et al., 1998). ....	52
Tabla 3-3 Parámetros físico-mecánicos terrazas glaciares (Basabe, P., et al., 1998). ....	54
Tabla 4-1 Resolución y calidad (Faro, 2011). ....	76
Tabla 4-2 Número puntos antes y después del proceso de reducción. ....	84
Tabla 5-1 Propiedades físicas y mecánicas del suelo condiciones normales de humedad , muestras tomadas de afloramientos. Ver Figura 4-13 (pag 90). ..	149
Tabla 5-2 Propiedades físicas y mecánicas del suelo (Ver anexo 10), sondeos Tecnosuelos (2006). ....	149
Tabla 5-3 Tabla de resumen de datos característicos de la muestra 2. ....	149
Tabla 5-4 Parámetros geotécnicos de la línea 1 mediante expresiones empíricas. ....	150



## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Irwin Rashid Samaniego Placencia, autor del trabajo de titulación "Caracterización de la tipología y cinemática del deslizamiento de la urbanización Trigales Altos, Cuenca, a partir de fotografías aéreas, estación total, escáner láser terrestre y ensayos geotécnicos del suelo", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 4 de mayo del 2018



---

Irwin Rashid Samaniego Placencia

C.I: 0104603659

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Irwin Rashid Samaniego Placencia en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Caracterización de la tipología y cinemática del deslizamiento de la urbanización Trigales Altos, Cuenca, a partir de fotografías aéreas, estación total, escáner láser terrestre y ensayos geotécnicos del suelo”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 4 de mayo del 2018



Irwin Rashid Samaniego Placencia

C.I: 0104603659



## AGRADECIMIENTO

Quisiera expresar un sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible esta investigación, al Ing. Enrique Acosta que gracias a apoyo incondicional a lo largo de la realización de este proyecto de titulación, al Ing. Rolando Armas quien siempre supo resolver las dudas presentadas. Al Centro de Energía de la Universidad de Cuenca que facilitó el uso del láser escáner, la empresa GEO & GEO por la colaboración para desarrollar los temas en el campo de la geofísica. Al Departamento de Gestión de Riegos del Gad Municipal de Cuenca por brindar información importante del área de estudio.

Finalmente, de manera especial agradecer el apoyo incondicional de mi madre, esposa, hermana, familia y amigo Juan F. que han sido un soporte en esta etapa de mi vida que concluye con el cierre y el comienzo de nuevos retos.



Dedicatoria:

A mi madre Miryam, ejemplo de vida, por su apoyo incondicional en los momentos más difíciles y por siempre estar pendiente de mí.

A mi padre Rolando que siempre está presente cuando lo necesito.

A mi amada esposa Anita, por acompañarme y apoyarme de cerca en cada objetivo planteado.

A mis tías Martha, María y Mariana que han sabido apoyarme de una y otra forma a lo largo de mi vida.

A mis hermanos que desde siempre nos hemos fortalecido y apoyado mutuamente.

A mis queridos sobrinos, porque ellos me inspiran cada día.

A cada persona que siempre estuvo y supo guiarme en el camino.

*“Cada dolor te hace más fuerte,  
cada traición más inteligente,  
cada desilusión más hábil, cada  
experiencia más sabio”*

Kamisama



---

## Capítulo 1

### Introducción

#### 1.1. Introducción y justificación

El Austro ecuatoriano forma parte de la zona montañosa de la Cordillera de los Andes. A causa de su ubicación y además de su situación geológica, se encuentra amenazada por diferentes tipos de procesos geológicos, los cuales generan numerosas zonas inestables. Entre algunos factores, podemos destacar: el relieve irregular y heterogéneo, la condición climática variable, los terremotos, además de la manipulación antrópica y anti-técnica de la morfología del terreno. Estos factores condicionan y generan continuamente deslizamientos que afectan los relieves montañosos que a menudo provocan daños en carreteras, edificaciones, presas, redes de abastecimiento de agua potable y alcantarillado y reliquias arqueológicas, entre otras. Los deslizamientos de ladera afectan a intereses humanos a nivel mundial, causando miles de muertes y daños económicos por billones de dólares cada año (Brabb y Harrod, 1989; González de Vallejo et al., 2002).

En la provincia del Azuay existen varias zonas vulnerables a deslizamientos, el más destacado que se conoce en la historia de la provincia fue el de “La Josefina” en el año de 1993, ocurrido en el sector del Tahuall en donde se deslizaron cerca de 25 millones de m<sup>3</sup> de roca (Frisona, 1994) del cerro Tamuga, matando a 72 personas (Chamot et al., 1993) y represó el río Paute formando un lago de 190 millones de m<sup>3</sup> (INECEL, 1993) que inundó un área de 1000 ha (Zeas, 1993). Esto puso en manifiesto la importancia que tienen los fenómenos naturales desastrosos y la falta de estudios de prevención por lo que llevo a cabo el Proyecto “Prevención de desastres naturales en la cuenca del río Paute, Ecuador” (Proyecto PRECUPA) culminado en el año de 1998, donde estudiaron y monitorearon los diferentes fenómenos que afectan la cuenca del río Paute.

El proyecto PRECUPA ubica el barrio de los Trigales Altos en zona sin movimientos de ladera detectados. Sin embargo, bajo condiciones hidrometeorológicas extremas o actividades antrópicas anti-técnicas, este sector es susceptible a fenómenos de inestabilidad de ladera (Basabe et al., 1998).



Trabajos más recientes (Gestion de Riegos, 2015; Tecnosuelos, 2006; Rivera, 2012) han identificado un deslizamiento activo en los Trigales Altos que afecta a un relleno sin obra de drenaje, ubicado en una zona de suelos expansivos, dañando viviendas, vías, así como redes de agua potable y alcantarillado.

En el trabajo de Gestión de Riesgos (2015) se presenta una cartografía de la cicatriz del deslizamiento en la que se identifica su corona, así como parte de los flancos izquierdo y derecho. Respecto a la masa deslizada, no se encuentra plenamente definida. Existe variedad en la opinión de los moradores de la zona, algunos dicen que el movimiento ya no es muy perceptible, pero otros dicen que las casas se inclinan cada vez que existe un invierno lluvioso, también existen familias que viven en casas “poco afectadas” en donde habitualmente tienen problemas de fisuras en el piso, además de la deformación de los marcos de puertas y ventanas.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Analizar las deformaciones que experimentan las estructuras de los edificios de la urbanización Trigales Altos debido al deslizamiento en el que se encuentran.

### **1.2.2. Objetivos específicos:**

- Establecer la geometría actual de la ladera.
- Realizar ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo de cada estrato.
- Determinar el factor de seguridad de la ladera en condiciones de humedades normal y saturada, así como con aceleración sísmica.

## **Capítulo 2**

### **Marco teórico**

#### **2.1. Movimientos de ladera**

Se entiende como movimiento de ladera, “slope movement” (Varnes, 1978), el movimiento de una masa de roca, suelo o derrubios, de una ladera en sentido descendente (Cruden, 1991) y se incluye cualquier tipo de movimiento en masa



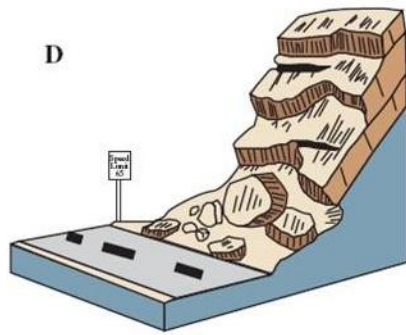
(se excluye por tanto la erosión), excepto la subsidencia y el hundimiento kárstico (Fernández, 2001). Otra definición que se manifiesta en términos análogos es la aportada por Corominas y García Yagüe (1997) definiendo movimientos de ladera como los movimientos del terreno o desplazamientos que afectan a los materiales en laderas o escarpes. Estos desplazamientos se producen hacia el exterior de las laderas y en sentido descendente como consecuencia de la fuerza de la gravedad. Los hundimientos de cavidades o de materiales están excluidos de estos movimientos (Varnes, 1978).

### **2.1.1. Clasificación de movimientos de ladera**

En la actualidad existen varias clasificaciones debido a la complejidad que abarca los movimientos de ladera, las cuales han sido investigadas por una amplia gama de disciplinas, por ello para poder clasificar los movimientos de ladera se debe tener en cuenta los criterios utilizados para su diferenciación. Estas clasificaciones se han basado, de manera general, en aspectos como los atributos morfológicos de los movimientos, tanto de la superficie de ruptura como del área de depósito (Blong, 1973; Brunsden, 1973; Crozier, 1973; Skempton, 1953); en el tipo y velocidad del movimiento (Coates, 1977; J. N. Hutchinson, 1968; Sharpe, 1938; Varnes, 1978; Ward, 1945; Zaruba & Menci, 1969); tamaño y tipo de los materiales involucrados (Coates, 1977; Varnes, 1978; Zaruba & Menci, 1969); antigüedad del movimiento (Zaruba & Menci, 1969); grado de actividad (Erskine, 1973); y tipo climático (J. N. Hutchinson, 1968; Sharpe, 1938).

A continuación se presenta una clasificación simplificada a partir de la propuesta elaborada por Varnes (1978) y Hutchinson (1988).





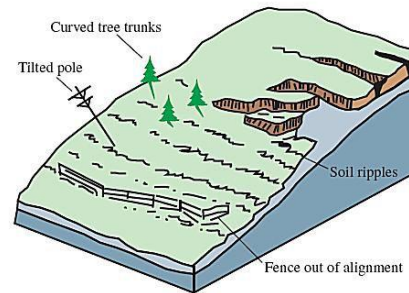
Caída de rocas



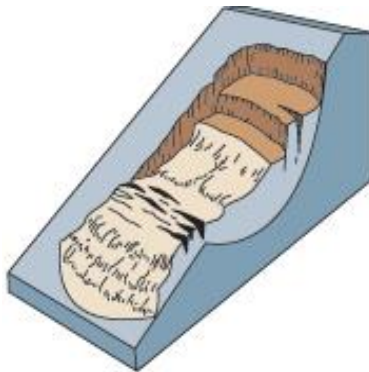
Avalancha de escombros



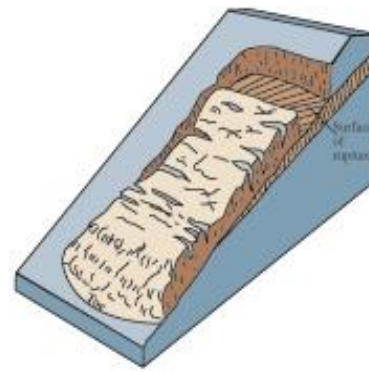
Volcamiento



Reptación



Deslizamientos rotacionales



Deslizamiento trasnacionales



Flujo de tierra

Figura 2-1 Tipos de movimiento de ladera (J. Hutchinson, 1988; Varnes, 1978).



#### **2.1.1.1. Derrumbes y caída de bloques**

Son fenómenos que presentan una ruptura brusca y caída más o menos libre y a gran velocidad de un bloque o una masa rocosa “en seco”. Gran parte del transporte se da en el medio aéreo, pero también existe un componente de salto y rodamiento. La zona de origen corresponde prioritariamente a acantilados rocosos o laderas de fuerte pendiente, donde la roca está fracturada y alterada.

Los volúmenes implicados suelen ser de hasta 100.000 m<sup>3</sup>. Tienen un alto componente de sorpresa, pues rara vez presentan signos precursores o anunciadores (o éstos son difíciles de detectar) y, muy a menudo, son desencadenados por factores exógenos (sismos, vibraciones de maquinaria pesada, explosiones, árboles sobre el macizo rocoso, etc.).

La velocidad del movimiento puede ser elevada hasta 40 m/s.

#### **2.1.1.2. Avalanchas de rocas / de detritos**

Son fenómenos que presentan una ruptura brusca y caída más o menos libre y a gran velocidad de una masa rocosa “en seco”. Gran parte del transporte se da en el medio aéreo, pero también existe un componente de salto y rodamiento. Se considera un evento catastrófico, temporalmente instantáneo y de muy alta recurrencia.

El volumen de material movilizado suele ser muy superior a los 100.000 m<sup>3</sup>, generalmente 1 ó varios millones de metros cúbicos de roca.

La velocidad del movimiento suele ser muy elevada >40m/s.

#### **2.1.1.3. Volcamiento o basculamiento**

Es el doblamiento de la parte superior de estratos o niveles de rocas afectadas por disyunciones. Es causado por acción de la gravedad terrestre o de procesos tectónicos distensivos. Existen dos variantes: el doblamiento plástico (en rocas metamórficas y, en menor medida, en pelíticas) y el doblamiento rígido, que podría ser llamado, más apropiadamente, basculamiento.

El material afectado son formaciones sedimentarias y metamórficas, por lo general de fuerte buzamiento y en vertientes contrarias siendo los esquistos los más sensibles a este doblamiento por los planos de esquistosidad o plegamiento.



El tipo de alabeamiento rígido se puede dar en columnas de basalto o formaciones similares con profundidades de hasta algunas centenas de metros.

Las causas que le originan es la deformación paulatina en dirección de la pendiente de paquetes estratificados, o afectados por disyunciones, con el mecanismo de deformación asociado a pivoteo o basculamiento de las cabezas de estratos teniendo como eje de rotación un punto en la base del paquete rocoso.

Generalmente el alabamiento evoluciona hacia deslizamientos al formarse una superficie de ruptura a lo largo de la línea de charnela o doblamiento.

#### **2.1.1.4. Reptación de suelos**

Es el desplazamiento lento, prácticamente imperceptible, que afecta a los materiales menos cohesivos de la cubierta de suelo (edáfica), es decir, a los materiales poco consolidados (particularmente a los terrenos de cultivo), afecta los suelos hasta una profundidad promedio de un metro. Es un fenómeno prácticamente invisible a nivel morfológico, por lo que puede ser reconocido sólo en cortes o a través de signos indirectos.

Presenta velocidades de pocos milímetros hasta más o menos un centímetro por año; decreciente en profundidad. Para zonas tropicales como la centroamericana (húmedas, con cubierta vegetal bien desarrollada) se ha demostrado que las velocidades promedio son de apenas 1-2 mm/año. En zonas semi-áridas con poca cubierta vegetal, la velocidad varía entre 5 y 10 mm/año.

En climas tropicales está sobre todo condicionada por la granulometría -que, a su vez, condiciona la cohesión del suelo- y por las variaciones en el grado de saturación del suelo (presión intersticial y fuerzas de percolación).

El mecanismo aparentemente se trata de un movimiento cíclico pendiente abajo, prácticamente grano por grano, del material terroso, de cohesión media a baja, sobre pendientes iguales o superiores a los 20°.

Sus efectos son desarreglos menores (inclinación y apertura de grietas en muros y postes de cimentación poco profunda, torceduras en los troncos de los árboles, discontinuidades en el manto vegetal bajo, etc.).



---

#### **2.1.1.5. Deslizamientos**

- **Deslizamientos rotacionales o circulares**

Movimiento relativamente lento de una masa de suelo, roca o ambos, a lo largo de una superficie de ruptura en forma circular (que coincide con la de transporte) sobre la cual se mueve una masa. En su fase inicial, existe poca distorsión de los materiales. En algunos casos, a medida que la masa se desplaza, los materiales se dislocan progresivamente y el mecanismo de inestabilidad deviene complejo.

Eventualmente se da en terrenos homogéneos, isotrópicos, cohesivos. Su ocurrencia en la naturaleza es rara en estado puro o efímera pues rápidamente evoluciona hacia mecanismos combinados.

Este tipo de movimientos pueden involucrar tanto volúmenes pequeños como volúmenes grandes de material. Y las velocidades de propagación de la masa desplazada pueden ser también muy variables.

- **Deslizamientos traslacionales**

Movimiento lento o rápido de un bloque de suelo o roca a lo largo de una superficie de deslizamiento planar. Se originan en zonas que presentan superficies de discontinuidad, de niveles poco competentes; también en bloques tabulares o paquetes de estratos dentro de estructuras conformes de estratificación o esquistosidad; sobre capas poco competentes o niveles de alteración; sobre planos de fallas o sistemas de diaclasas conformes (a favor de la pendiente).

El material afectado es rocoso, estratificado o diaclasado, formando placas o paquetes cuyas bases quedan desprovistas de soporte, ya sea por erosión natural o por cortes artificiales en un talud (es tal vez el problema geodinámico más comúnmente desencadenado por la intervención humana, cuando se hacen cortes para carreteras, canales, etc.).

Este tipo de movimientos pueden involucrar tanto volúmenes pequeños como volúmenes grandes de material. Las velocidades de propagación de la masa desplazada pueden ser también muy variables.

---

#### **2.1.1.6. Coladas o flujos**

Son masas de material sin cohesión que fluye como un fluido viscoso al sobrepasar su límite líquido, pueden formarse en cualquier material poco consolidado (inclusive puede llegar a afectar los niveles superiores de roca alterada o intemperizada) y hasta en rocas, especialmente pelíticas y esquistosas más o menos descompuestas. Se pueden desplazar grandes distancias.

Son fenómenos básicamente estacionales, es decir, frecuentes en temporada de lluvias, aunque son numerosos los casos relacionados con roturas de conductos de agua, depósitos de agua, o por efecto de la aceleración de deslizamientos, por trastornos en el régimen hidrogeológico e, inclusive, por sacudida sísmica (licuación de arenas). En dependencia del material movilizado puede haber:

- **Flujo de lodo**

Suele involucrar volúmenes variables de material fino con alto contenido de limos y arcillas. Las velocidades de desplazamiento igualmente pueden ser variables y suelen estar relacionadas con factores como la pendiente de la ladera y la cantidad de agua involucrada en la movilización del material.

- **Flujo de tierra**

Suelen presentar grandes volúmenes de material terroso con menos de 2 mm de diámetro predominando sobre limos y arcillas, generando formas de lengua o de gran lóbulo. Las velocidades medias del movimiento pueden variar entre: cm – dm / año a cm – m / día (estas pueden no ser homogéneas en toda la colada).

- **Flujo de detritos**

Suelen involucrar volúmenes de medianos a grandes de hasta 10.000 m<sup>3</sup> de material grueso de diferente diámetro que incluye bloques de rocas, derrubios y roca descompuesta. Generan trazas lineales bien definidas, como un corredor alargado, con embudos o conos divergentes en los extremos, generalmente con conexión con la red de drenaje. Las velocidades de movilización suelen ser rápidas a muy rápidas.



### **2.1.2. Deslizamiento**

Existen diferentes acepciones sobre el término deslizamiento que han sido elaboradas por diferentes investigadores. A continuación, se muestran algunas de ellas.

Sharpe (1938) define como un movimiento perceptible ladera abajo de una masa relativamente seca de tierra, roca o de una mezcla de ambas, a través de un mecanismo de deslizamiento o desprendimiento.

Terzaghi (1950) explica que es el desplazamiento rápido de una masa de roca, suelo residual o sedimentos de una ladera, en el cual el centro de gravedad de la masa que se desplaza se mueve hacia abajo y hacia el exterior.

Tiempo después, Varnes (1958) especifica que este movimiento hacia abajo de los materiales formadores de las laderas puede incluir materiales naturales y artificiales.

Zaruba y Mencl (1969) hablan de un movimiento rápido de rocas en deslizamiento, las cuales están separadas por un plano definido en posición estacionaria infrayacente.

Skempton y Hutchinson (1969) definen el término deslizamiento (landslide) como un movimiento de ladera abajo de masas de suelo o roca, que ocurre en una superficie de cizallamiento en los límites de la masa desplazada.

Para Gary y colaboradores (1972), la palabra deslizamiento es un término general que considera una gran variedad de formas y procesos de remoción en masa, las cuales involucran el transporte gravitacional a una velocidad de moderadamente rápida a rápida, de un cuerpo de suelos o rocas ladera abajo, la cual no siempre ocurre sobre una superficie de deslizamiento.

Por otro lado, de acuerdo con Coates (1977), un deslizamiento representa una categoría de fenómenos incluidos dentro de los movimientos de remoción en masa, en los cuales la gravedad es la principal fuerza involucrada.

Brunsden (1979) opta por el término proceso de remoción en masa e indica que éste sirve para definir aquellos movimientos ladera abajo que no requieren el transporte de un medio como el agua, el aire o el hielo.



Para Cruden (1991), el deslizamiento es el movimiento de una masa de roca, detritos y tierra, pendiente abajo. La ocurrencia de los deslizamientos es consecuencia de un complejo campo de esfuerzos, el cual es activo sobre una masa de roca o suelo. El movimiento ocurre cuando el esfuerzo de corte excede el esfuerzo de resistencia del material.

Según Suárez (1998), estos movimientos consisten en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada, el movimiento puede ser progresivo, o sea, que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda la que sería la superficie de falla.

### **2.1.3. Partes de un deslizamiento**

En la Figura 2-2 se muestra un deslizamiento. Según Suárez (2009), las partes principales son las siguientes:

**Cabeza:** Parte superior de la masa de material que se mueve. La cabeza del deslizamiento no corresponde necesariamente a la cabeza del talud. Arriba de la cabeza está la corona.

**Cima:** El punto más alto de la cabeza, en el contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.

**Corona:** El material que se encuentra en el sitio, (prácticamente inalterado), adyacente a la parte más alta del escarpe principal, por encima de la cabeza.

**Escarpe principal:** Superficie muy inclinada a lo largo de la periferia posterior del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material conforma la superficie de la falla.

**Escarpe secundario:** Superficie muy inclinada producida por el desplazamiento diferencial dentro de la masa que se mueve. En un deslizamiento pueden formarse varios escarpes secundarios.

**Superficie de falla:** Área por debajo del movimiento y que delimita el volumen del material desplazado. El suelo por debajo de la superficie de la falla no se mueve, mientras que el que se encuentra por encima de ésta, se desplaza.



**Pie de la superficie de falla:** La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.

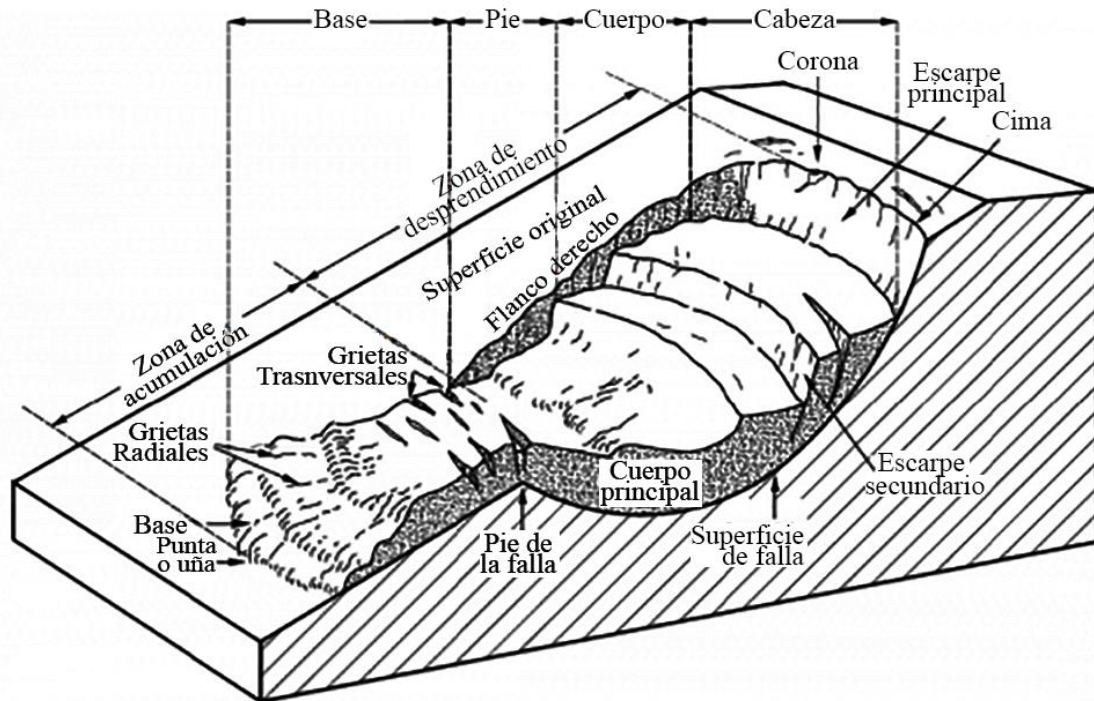


Figura 2-2 Partes de un deslizamiento, tomada de Suárez (2009).

**Base:** Área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.

**Punta o uña:** Punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.

**Cuerpo principal del deslizamiento:** El material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla. Se pueden presentar varios cuerpos en movimiento.

**Superficie original del terreno:** La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.

**Costado o flanco:** un lado (perfil lateral) del movimiento. Se debe diferenciar el flanco derecho y el izquierdo.

## 2.2. Exploración de subsuelo

La exploración de suelo presentada en esta tesis se clasificará en métodos directos e indirectos, los métodos directos o sondeos obtienen muestras alteradas o inalteradas que con ensayos geotécnicos in situ o en laboratorio se



obtienen parámetros físicos y mecánicos del suelo, en cambio, los métodos indirectos que corresponden a los métodos geofísicos que se basan en medidas físicas tomadas generalmente en la superficie del terreno. La geofísica se diferencia con los sondeos en que realizan estimaciones del material estudiado y también son de menor costo.

### **2.2.1. Métodos indirectos**

Los métodos usados en el proyecto, se describe a continuación:

#### **2.2.1.1. MASW.**

El método MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves, Análisis Multicanal de Ondas Superficiales) propuesto por Park et al. (1999), es uno de los métodos sísmicos de evaluación de la condición elástica del suelo para fines de ingeniería geotécnica (Correia, 2015), usa diferentes cantidades de receptores extendidos en modelos lineales, espaciados a distancias iguales y conectadas a un canal individual de registro generadas a partir de diversas fuentes, analizan la velocidad de propagación de las ondas superficiales con la intención de obtener información sobre la variación de la velocidad de la onda S relacionada con la profundidad de la zona estudiada (López Avalos, Mejía Carrillos, & Vega, 2008).

El estudio con fuente activa es el más común utilizado. Un martillo bastante pesado, usando una placa de impacto, también llamada placa base, la que ayudará a que el punto de impacto fuente perturbe menos el suelo, es una buena opción como fuente sísmica, aunque otras fuentes más sofisticadas que pueden entregar más potencia de impacto en tierra puede ser una ventaja, debido a su potencial para generar más y bajas frecuencias (longitudes de onda) de ondas superficiales (Correia, 2015).

Los geófonos que deben ser utilizados en la implementación de este método deben ser verticales y de bajas frecuencias, como 4,5 Hz. A diferencia de los métodos de reflexión de ondas sísmicas, una disminución en la frecuencia no es tan crítica ni influye de manera considerable en la sensibilidad de los datos adquiridos (Correia, 2015). El método MASW a diferencia de los métodos de medición directa de la velocidad de onda de corte, lo cual es notoriamente difícil debido a las dificultades de mantener una razón ruido/señal favorable durante la



adquisición y etapas de procesamiento, es uno de los métodos sísmicos más fáciles que entregan resultados competentes. La adquisición de datos es significativamente más tolerante que en otros métodos debido a la facilidad con que se mantiene la razón señal/ruido favorable para la medición. Esta razón señal/ruido es el factor que hace que las ondas de corte superficiales sean las ondas sísmicas más fuertes generadas que pueden viajar distancias mayores que las ondas de cuerpo sin sufrir de contaminación por ruidos externos (Correia, 2015).

#### **2.2.1.2. ReMi.**

Esta técnica conocida también como sísmica de microtemores (Refraction Microtremor), fue propuesta por Louie (2001), y es uno de los métodos más difundidos en la rama de la Ingeniería Civil y constituye uno de los recientes avances entre los métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos y evaluación de terrenos. Este método obtiene información general, en una dimensión, de volúmenes grandes de subsuelo. El fundamento teórico del método es el mismo que las del Análisis Espectrales de Ondas Superficiales (SASW) y de los Análisis Multicanales de Ondas Superficiales (MASW) (Rucker, 2003). Este método es de gran aplicabilidad en zonas de ambientes urbanos, ya que a diferencia que la prueba tradicional de retracción sísmica, anteriormente explicada, el ruido es un factor que favorece al sondeo.

#### **2.2.1.3. ESAC.**

Este método se basa en estudiar las características del ruido ambiental en la superficie del suelo, tanto en tiempo como en el espacio. Las velocidades verticales registradas por sensores en distintos puntos en la superficie, durante un periodo de tiempo, son consideradas en este método como ondas superficiales que satisfacen una ecuación de onda definida en el tiempo y en el espacio, y a la vez, como muestras de un fenómeno estocástico estacionario en el tiempo y en el espacio (Cintas, 2013).

#### **2.2.2. Métodos directos.**

Los datos obtenidos para el estudio se obtuvieron por los siguientes métodos:



### **2.2.2.1. Calicatas y pozos**

Las calicatas son excavaciones que nos permiten estudiar el subsuelo. Generalmente éstas se realizan mediante retroexcavadora o manualmente, con esto se puede realizar una inspección directa del suelo, tomas de muestras apropiadas para la realización de pruebas correspondientes en el laboratorio, y/o realización de ensayos en campo. En realidad, es en el laboratorio de mecánica de suelos en donde el proyectista ha de obtener los datos definitivos para su trabajo, tanto para construir o como para rehabilitar una estructura.

## **2.3. Ensayos geotécnicos para la determinación de parámetros físicos y mecánicos de suelo.**

### **2.3.1. Ensayos geotécnicos in-situ**

#### **2.3.1.1. SPT (Standard Penetration Test)**

El Ensayo de Penetración Estándar inicia en el año 1927 y es el pionero de los ensayos in situ tal cual hoy son conocidos. Fue desarrollado por un sondista de la Raymond Concrete Pile Co., quien propuso a Terzaghi contabilizar el número de golpes necesarios para hincar 1 pie el tomamuestra (Devincenzi & Frank, 2004).

Después de acumular un gran número de ensayos, Terzaghi y Peck (1948) publicaron los resultados y hoy en día es uno de los ensayos más utilizados debido a la sencillez de su ejecución, además de ser más económico que los ensayos en laboratorio (Devincenzi & Frank, 2004)

El ensayo de penetración estándar (Standard Penetration Test) SPT, determina las propiedades ingenieriles de los suelos y su aplicación a los problemas geotécnicos. Su metodología incluye la penetración dinámica de un elemento captor (cuchara partida), el cual normalizado y debidamente calibrado permite cuantificar algunas propiedades mecánicas (Aguay & Dranichnikov, 2015).

El ensayo consiste en hincar un tomamuestras o cuchara partida, de 0,45 m (18 in) de largo colocado al extremo de una varilla de acero macizo que se utiliza para transmitir la energía de golpeo, por medio de un peso (martillo) de 63,5 kg (140 lb) que se deja caer libremente desde una altura de 0,76 m (30 in). Todo el

procedimiento se contabiliza y se anota el número de golpes necesarios para hincar la cuchara los primeros 15 centímetros, N entre 0 y 15 cm.

Seguidamente se realiza la prueba en sí, introduciendo otros 30 centímetros, anotando el número de golpes requerido para la hincada en cada intervalo de 15 centímetros de penetración N entre 15 y 30 cm y N entre 30 y 45 cm.

La lectura del golpeo del primer y último tramo no se tiene en cuenta, del primer por posible alteración del suelo o derrumbes de las paredes del sondeo y del último por posible compactación en segundo.

Los valores del golpeo de los tramos conducen al resultado del ensayo es el golpeo SPT o resistencia a la penetración estándar:

$$N_{SPT} = N_{15-30} + N_{30-45}$$

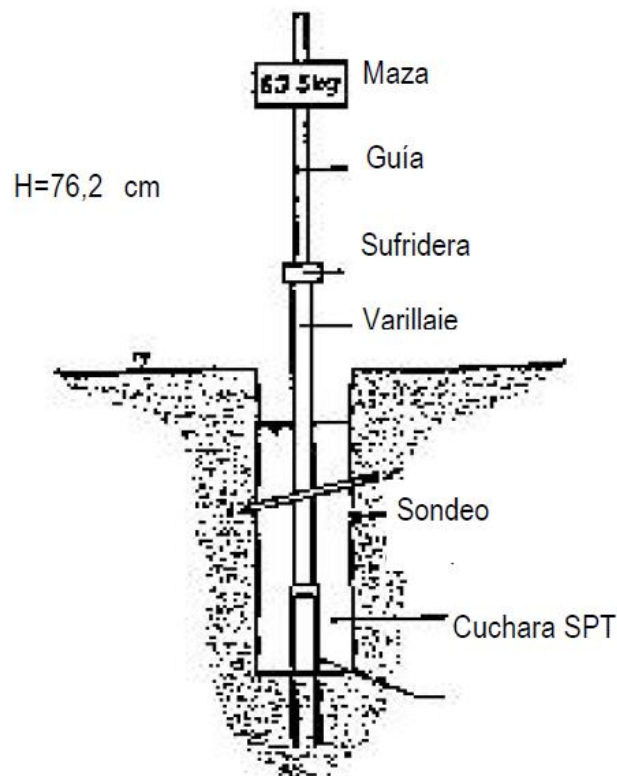


Figura 2-3 Esquema del ensayo de penetración estándar (SPT) (Devincenzi & Frank, 2004).

En ensayos in situ como lo es SPT se puede apreciar la heterogeneidad del subsuelo y someter los resultados experimentales a un análisis estadístico de los parámetros mecánicos y no adoptar sistemáticamente los valores más débiles como se tiene tendencia a hacer con los ensayos de laboratorio. Por otra



parte, presentan otras valiosas ventajas: son rápidos, relativamente económicas y proporcionan una abundante cantidad de datos (Devincenzi & Frank, 2004).

Los resultados del ensayo se correlacionan empíricamente con las propiedades específicas in situ del terreno. La gran mayoría de datos y correlaciones corresponden a terrenos arenosos. La presencia de gravas complica la interpretación, cuando no impide su realización. En resumen, el ensayo resulta apropiado para terrenos en los que predomina la fracción arena (Muelas Rodríguez, 2010).

Existen varios métodos para determinación de los parámetros del suelo entre los más conocidos y aplicado en nuestro medio son:

- Corte directo
- Proctor estándar
- Límite de consistencia o límites de Atterberg
- Clasificación del suelo, método SUCS y ASHTO
- Ensayo triaxial consolidado- No drenado con medición de poro

A continuación, se describirán los métodos usados en el estudio.

### **2.3.2. Ensayos geotécnicos laboratorio**

#### **2.3.2.1. Límite de consistencia o límites de Atterberg**

Los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico se obtienen mediante los límites de Atterberg con ensayos de laboratorio y sirven para clasificar el suelo mediante el método de clasificación unificada SUCS, el método trata de encontrar el contenido de agua en el punto de transición del estado semisólido a plástico; según el contenido de agua en orden decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia, definidos por Atterberg.

- a) Estado líquido, con las propiedades y apariencia de una suspensión.
- b) Estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.
- c) Estado plástico, en que el suelo se comporta plásticamente.



- d) Estado semisólido, en el que el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aun disminuye de volumen al estar sujeto a secado.
- e) Estado sólido, en que el volumen del suelo no varía con el secado.
- **Limite líquido, LL.**



*Figura 2-4 Cuchara de Casagrande.*

Este ensayo se obtiene mediante la cuchara de Casagrande (Figura 2-4) donde se determina el contenido de agua del suelo respecto al peso seco del terreno, se debe verificar que la ranura deberá cerrarse en un tramo de 1.27cm (Figura 2-5) después de una secuencia de 25 golpes a 1 cm de caída libre y dos golpes por segundo. El suelo pasa de un estado plástico de un estado líquido.



*Figura 2-5 Ensayo para la determinación de límite líquido por medio de la cuchara de Casagrande.*



- **Limite plástico, LP.**

Es el contenido de humedad para el cual el suelo comienza a agrietarse cuando es amasado en cilindros de 3 mm de diámetro. El suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico.

- El índice de plasticidad (IP).

Es la diferencia entre el limite líquido y el limite plástico de un suelo:  $IP = LL - LP$ .

### 2.3.2.2. Clasificación de suelos

Primera y/o segunda letra		Segunda letra	
Símbolo	Definición	Letra	Definición
<b>G</b>	grava	<b>P</b>	Pobrementemente gradado (tamaño de partícula uniforme)
<b>S</b>	arena	<b>W</b>	Bien gradado (tamaños de partículas diversos)
<b>M</b>	limo	<b>H</b>	Alta plasticidad
<b>C</b>	arcilla	<b>L</b>	Baja plasticidad
<b>O</b>	orgánico		

Tabla 2-1 Clasificación del suelo por el tamaño de las partículas. Fuente: Braja Das, 1983.

SUCS es usado en Ingeniería y Geología para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo, y puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar. La clasificación se representa mediante un símbolo con dos letras (excepto suelos altamente orgánicos), y cada letra es descrita debajo en la Tabla 2-1. Para clasificar el suelo hay que realizar previamente una granulometría del suelo mediante tamizado u otros métodos (Das, 1983).

En caso de ser requerido, es posible utilizar una doble notación. Por ejemplo, si el suelo tiene entre un 5-12% de finos que pasan a través de un tamiz #200 se considera que ambas distribuciones serían gravas bien graduadas, pero con limos, y su doble notación sería GW-GM (grava bien graduada y grava con limo). Las posibles notaciones se mencionan a continuación en la Tabla 2-2 (Das, 1983).



Divisiones mayores			Símbolo del grupo	Nombre del grupo
<b>Suelos granulares gruesos</b> más del 50% retenido en el tamiz nº200 (0.075 mm)	<b>Grava</b> > 50% de la fracción gruesa retenida en el tamiz nº4 (4.75 mm)	Grava limpia menos del 5% pasa el tamiz nº200	<b>GW</b>	Grava bien gradada, grava fina a gruesa
			<b>GP</b>	Grava pobremente gradada
		Grava con más de 12% de finos pasantes del tamiz nº 200	<b>GM</b>	Grava limosa
			<b>GC</b>	Grava arcillosa
	<b>Arena</b> ≥ 50% de fracción gruesa que pasa el tamiz nº4	Arena limpia	<b>SW</b>	Arena bien gradada, arena fina a gruesa.
			<b>SP</b>	Arena pobremente gradada
		Arena con más de 12% de finos pasantes del tamiz nº 200	<b>SM</b>	Arena limosa
			<b>SC</b>	Arena arcillosa
<b>Suelos de grano fino</b> más del 50% pasa el tamiz No.200	Limos y arcillas límite líquido < 50	Inorgánico	<b>ML</b>	Limo
			<b>CL</b>	Arcilla
		Orgánico	<b>OL</b>	Limo orgánico, arcilla orgánica
	Limo y arcilla límite líquido ≥ 50	Inorgánico	<b>MH</b>	Limo de alta plasticidad, limo elástico
			<b>CH</b>	Arcilla de alta plasticidad
		Orgánico	<b>OH</b>	Arcilla orgánica, Limo orgánico
<b>Suelos altamente orgánicos</b>			<b>Pt</b>	Turba

Tabla 2-2 Clasificación de los suelos por el método SUCS. Fuente: Braja Das, 1983.

### 2.3.2.3. Ensayo triaxial consolidado- no drenado con medición de presión de poro en muestras compactada y saturadas

Las pruebas de compresión triaxial se realizan con el propósito de determinar las características de esfuerzo-deformación y resistencia de los suelos sujetos a esfuerzos cortantes, producidos cuando varían los esfuerzos principales que actúan sobre un espécimen cilíndrico del suelo de que se trate. Para el desarrollo del ensayo triaxial se utilizará la cámara triaxial mostrada en la Figura 2-6.

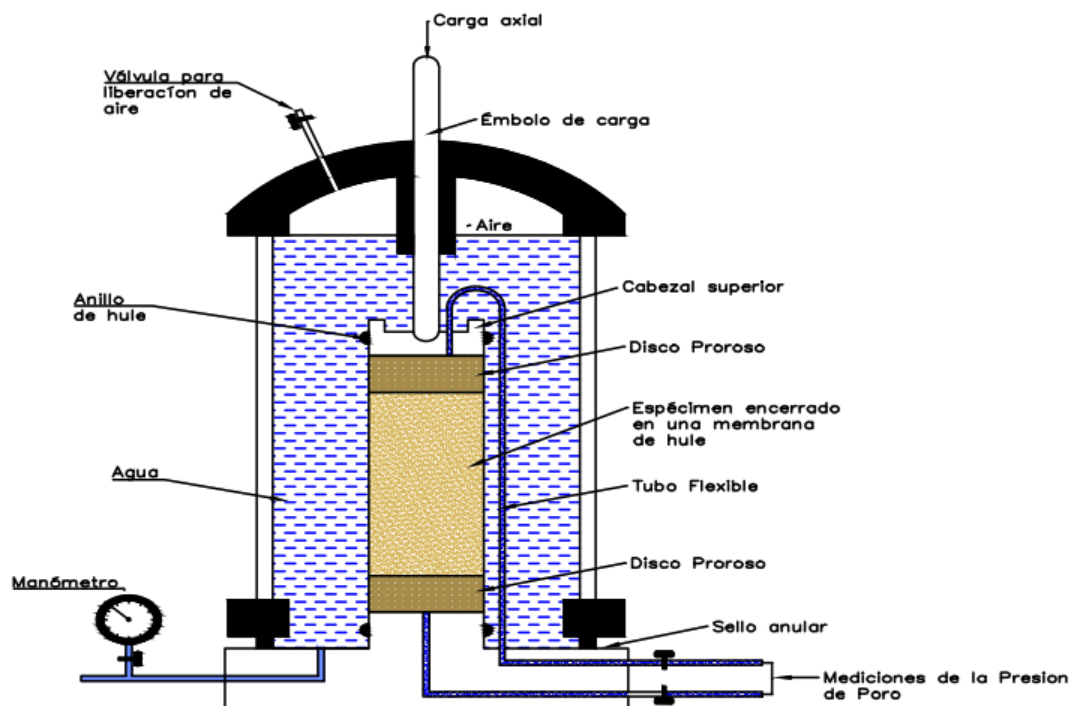


Figura 2-6 Máquina de Compresión Triaxial.

### 2.3.2.4. Ensayo corte directo

Este ensayo que se realiza con el instrumento mostrado en la Figura 2-7, nos permite determinar la resistencia a cortante de una muestra de suelo, simulando las fatigas y/o deformaciones que simulen las que existen o podrían existir en el terreno al estar sometido a una carga cualquiera. Este ensayo es simple y económico, pero presenta inconvenientes debido al poco control que se tiene sobre las condiciones de drenaje y la dificultad de medir presiones de poro. Este método consiste en colocar el espécimen en una caja de corte metálica de forma cuadrática o circular y cortada en dos partes. Al ensayar la muestra aplica una fuerza normal y una fuerza cortante. Generalmente se ensayan tres o más

especímenes, aplicando una fuerza normal diferente a cada uno, determinando así la resistencia al corte y al desplazamiento, esto nos permite determinar las propiedades de resistencia a partir de las envolventes de resistencia de Mohr, las que se grafican a partir de los esfuerzos normales y tangenciales resultantes en el momento de falla o rotura de la muestra ver Figura 2-8.



Figura 2-7 Maquina corte directo del laboratorio de suelos de la Universidad de Cuenca.

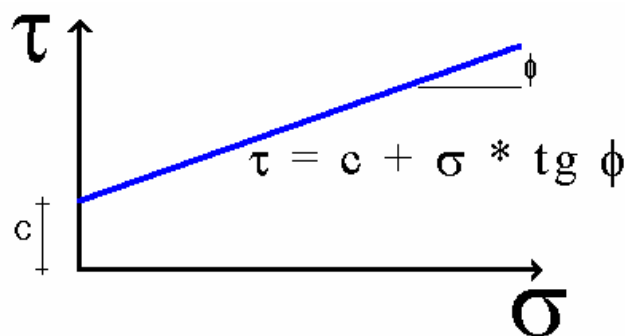


Figura 2-8 Recta intrínseca.

## 2.4. Estabilidad de laderas y taludes.

Esta sección es fundamentada en el libro “Presas de Tierra”, epígrafe 5 (Armas & Horta, 1987)

Uno de los métodos de análisis de estabilidad de taludes más utilizados mundialmente es el conocido análisis de Equilibrio Límite, que consiste en

imaginar un mecanismo de falla para el talud y aplicar a tal mecanismo los criterios de resistencia del material (criterios de Coulomb), de manera de ver si, con tal resistencia, hay o no la posibilidad de que el mecanismo de falla supuesto llegue a presentarse. Este método de análisis de Equilibrio Límite considera que el fallo ocurre por un deslizamiento de la masa de suelo actuando como un cuerpo rígido a lo largo de una superficie de falla supuesta, y que a lo largo de esa superficie el suelo desarrolla la máxima resistencia a cortante.

La estabilidad de los taludes se determina a través del factor de seguridad. Este factor expresa “la magnitud en que puede reducirse la resistencia a cortante del suelo para que se produzca el deslizamiento a lo largo de la superficie de falla más desfavorable”(Armas & Horta, 1987).

El factor de seguridad depende de:

- La representatividad de los parámetros mecánicos del material de la cimentación y del cuerpo del talud, obtenidos mediante investigación geotécnica, en función de los estados de carga que se necesiten estudiar al diseñar el talud.
- El método de análisis de estabilidad.
- La aproximación al asumir los valores de las presiones de poro y la forma de manipular éstas, al realizar el análisis de estabilidad.

Dado un talud con geometría establecida y propiedades de suelo definidas, se obtendrá un factor de seguridad mínimo ( $F_{\min}$ ), que expresa la magnitud de la reducción que deben experimentar los parámetros de resistencia a cortante del suelo, según el criterio de Coulomb ( $c$  y  $\tan(\phi)$ ), para alcanzar un estado de Equilibrio Límite. El factor de seguridad mínimo de todas las posibles superficies de falla debe cumplir la siguiente condición de diseño:

$$F_{\min} \leq F_{\text{norma}}$$

Los códigos internacionales de construcción de muchos países del mundo, establecen como  $F_{\text{norma}}$ , el valor de 1.5, el cual está en función de la economía y de los riesgos a asumir en caso de producirse un deslizamiento.

### 2.4.1. Métodos de análisis de estabilidad de laderas y taludes.

Los métodos aproximados de análisis de estabilidad más usados a nivel mundial, son los métodos de Fellenius y Bishop, que proponen realizar la hipótesis de una superficie de falla circular, con el objetivo de facilitar los cálculos y teniendo en cuenta que esta suposición es parecida al mecanismo real de falla.

Para realizar el análisis de estabilidad de taludes en materiales que tienen cohesión y fricción, es requerido dividir la masa deslizante en dovelas. Desde el punto de vista de la Estática, la obtención del factor de seguridad para una determinada superficie de deslizamiento implica, resolver un problema estáticamente indeterminado.

En la Figura 2-9 podemos ver un círculo de falla de radio R y las fuerzas que actúan sobre una dovela.

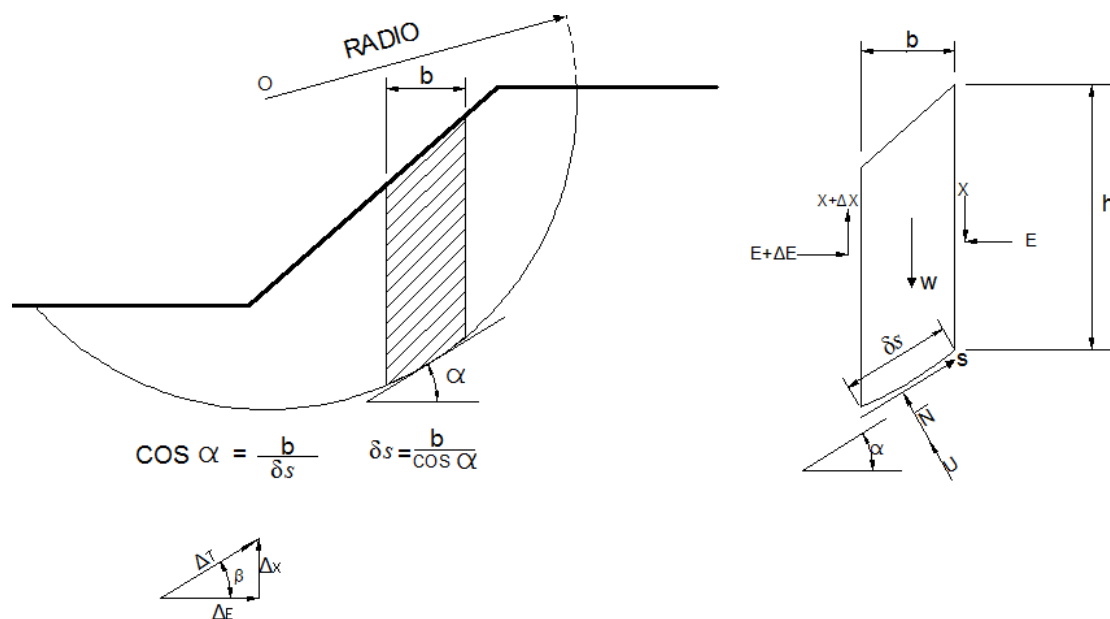


Figura 2-9 Círculo de falla de radio R y las fuerzas que actúan sobre una dovela (Armas & Horta, 1987).

Donde:

$\bar{N}$  = Resultante normal sobre una dovela.

U = Resultante de presión de poros.

W = Peso de cada dovela analizada.

$\alpha$  = Ángulo entre la tangente del centro de cada dovela y la horizontal.



$\Delta T$  = Resultantes de las fuerzas laterales en la cara de contacto de las dovelas.

$E$  = Tensión normal en el costado de cada dovela.

$S$  = Resistencia a cortante.

$\delta_s$  = Longitud de arco de una dovela.

$x$  = Distancia horizontal del centro de gravedad de la dovela a la vertical que pasa por el centro del círculo.

$b$  = Ancho de la dovela.

$h$  = Altura de la dovela.

En la Tabla 2-3 se enuncian las incógnitas asociadas al equilibrio de fuerzas y momentos para las  $n$  dovelas en las que ha sido dividida la masa deslizante.

Los métodos de análisis de estabilidad de taludes más usados en la práctica sólo consideran el equilibrio de las fuerzas actuantes en la dovela y no consideran el equilibrio de momentos, reduciéndose el sistema de ecuaciones a  $3n-1$  incógnitas para  $2n$  ecuaciones.

#### A. Incógnitas asociadas al equilibrio de fuerzas

- 
- $n$ : Resultantes de las fuerzas normales,  $N^+$ , sobre la base de cada dovela.
- $1$ : Factor de Seguridad.
- $n-1$ : Resultantes de las fuerzas laterales,  $\Delta T$ , en la cara de contacto de las dovelas o rebanadas.
- $n-1$ : Ángulos  $\beta$  que expresa la inclinación de la resultante  $\Delta T$  con respecto a la horizontal.
- $3n-1$ : **Incógnitas para  $2n$  ecuaciones.**

#### B. Incógnitas asociadas al equilibrio de momentos

- 
- $n$ : Coordenadas de situación de las resultantes,  $N^+$ , sobre la base de cada dovela.
- $n-1$ : Coordenadas de situación de la resultante  $\Delta T$
- $2n-1$ : **Incógnitas para  $n$  ecuaciones.**

#### C. Total de incógnitas

- 
- $5n-2$ : **Incógnitas para  $3n$  ecuaciones.**

*Tabla 2-3 Incógnitas asociadas al equilibrio de fuerzas y momentos para las "n" dovelas (Armas & Horta, 1987).*



Los métodos de análisis de estabilidad de taludes más usados en la práctica sólo consideran el equilibrio de las fuerzas actuantes en la dovela y no consideran el equilibrio de momentos, reduciéndose el sistema de ecuaciones a  $3n-1$  incógnitas para  $2n$  ecuaciones.

Finalmente, con el objetivo de obtener un sistema determinado de ecuaciones de  $2n$  ecuaciones con  $2n$  incógnitas, se procede a hacer  $n$ -hipótesis sobre el ángulo  $\beta$ .

En la Figura 2.10 podemos observar el polígono de fuerzas general que actúan sobre una dovela.

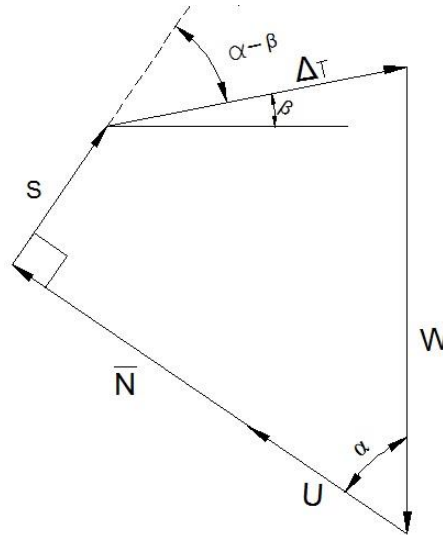


Figura 2-10 Polígono de fuerzas actuantes en una dovela, para  $\beta$  conocido. (Armas & Horta, 1987).

Al proyectar las fuerzas en las direcciones N y S, (ver Figura 2-10), se obtienen las siguientes ecuaciones de equilibrio:

$$(\bar{N} + U) = W \cos \alpha + \Delta T \sin(\alpha + \beta)$$

$$S + \Delta T \cos(\alpha - \beta) = W \sin \alpha$$

Donde:

$\beta$  = Ángulo de inclinación de la resultante  $\Delta T$  con respecto a la horizontal.

$S$  = Resistencia a cortante.

Debido a que el factor de seguridad “es la magnitud en que puede reducirse la resistencia a cortante del suelo para que se produzca el deslizamiento a lo largo



de la superficie de falla más desfavorable” (Armas & Horta, 1987) en cada dovela, se obtiene la siguiente ecuación:

$$S = \frac{1}{F} (C' + \bar{N} \tan \phi')$$

Siendo:

$$C' = c' \delta_s$$

Donde:

$\phi'$  = Ángulo de fricción interna efectivo.

$c'$  = Cohesión efectiva.

$F$  = Factor de seguridad.

$\delta_s$  = Longitud de arco de una dovela.

Reemplazando el equivalente de  $S$  de la Ec. 3 en la Ec. 2 tenemos:

$$\frac{1}{F} (C' + \bar{N} \tan \phi') + \Delta T \cos(\alpha - \beta) = W \sin \alpha$$

Por lo tanto, el sistema de  $2n$  ecuaciones que define el equilibrio de la masa deslizante, es el sistema de ecuaciones que forman la Ec. 1 y la Ec. 5.

No obstante, otra forma de análisis del equilibrio de la masa deslizante, es analizarla como un todo, omitiendo las fuerzas internas y los empujes interdovelas, puesto que no interfieren en el equilibrio general, mediante la siguiente afirmación:

$$\sum W \cdot x = \sum S \cdot R$$

Donde:

$x$  = Distancia horizontal del centro de gravedad de la dovela a la vertical que pasa por el centro del círculo.

$R$  = Radio del círculo.

Reemplazando la Ec. 3 en la Ec. 6 tenemos:

$$F = \frac{R \sum (C' + \bar{N} \tan \phi')}{\sum W \cdot x}$$

En la Ec. 7 observamos que las únicas incógnitas son los n valores N

Operando la Ec. 1 y Ec. 5, tenemos:

$$\bar{N} = \frac{W \cos[1 + \tan(\alpha - \beta)] - \frac{1}{F} C' \tan(\alpha - \beta) - U}{1 + \frac{\tan \phi' \tan(\alpha - \beta)}{F}}$$

En la Ec. 8 observamos que no se necesita obtener el valor de  $\Delta T$  para obtener el factor de seguridad.

#### 2.4.1.1. Método de Fellenius

El método de Fellenius consiste en hacer la hipótesis de que  $\beta = \alpha$ , para cada dovela. Por lo tanto, la Ec. 8, quedaría:

$$\bar{N} = W \cos \alpha - U$$

Sustituyendo la Ec. 9 en la Ec. 7, tenemos:

$$F = \frac{R \sum c' \cdot \delta_s}{\sum W \cdot x} + \frac{R \sum (W \cos \alpha - u \cdot \delta_s) \tan \phi'}{\sum W \cdot x}$$

Donde:

u= Presión de poros.

#### 2.4.1.2. Método de Bishop simplificado

El método de Bishop Simplificado supone que el ángulo  $\beta = 0$  en cada dovela. Por lo tanto, la Ec. 8 quedaría:

$$\bar{N} = \frac{\frac{(W - c' \cdot b \cdot \tan \alpha - u \cdot b) \sec \alpha}{F}}{1 + \frac{\tan \phi' \cdot \tan \alpha}{F}}$$

Donde:

b: Ancho de la dovela.

Sustituyendo esta ecuación en la Ec. 7 tenemos:

$$F = \frac{R \sum \left\{ [c'b + (W - ub) \tan \phi'] \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{F}} \right\}}{\sum W \cdot x}$$

Que también se puede expresar como:

$$F = \frac{R \sum c' \cdot \delta_s \cdot \eta}{\sum W \cdot x} + \frac{R \sum (W - ub) \varepsilon \tan \phi'}{\sum W \cdot x}$$

Donde:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{F}}$$

$$\varepsilon = \eta \cdot \sec \alpha$$

## 2.5. Escáner láser terrestre

El láser escáner o LÍDAR terrestre (TLS; acrónimo de Terrestrial Laser Scanning) se basa en el mismo principio que el LÍDAR aerotransportado (ALS). Esto es, el barrido de la zona a levantar se realiza mediante un láser, sólo que en este caso el barrido se realiza desde un equipo estacionado sobre un trípode apoyado en la superficie del terreno. De ahí que esta técnica también se conozca como “Ground Based Lidar Technology”. Este dispositivo terrestre está provisto de un láser que mide ángulos, distancias e intensidad de los puntos impactados por el láser, de manera sistemática. El resultado es una nube de puntos 3D que representa el modelo escaneado (Arco, 2010). La técnica se caracteriza por una alta repetibilidad de la medida con precisión y exactitud milimétrica, y hace posible la explotación de toda una superficie escaneada así como la detección de rasgos de menor tamaño. El caso más común es que el equipo se estacione en un punto fijo, lo que simplifica bastante el sensor ya que no es necesario disponer de un sistema inercial. Lo único que se precisa es el propio escáner y un instrumento de referencia que permita obtener coordenadas absolutas, generalmente un GPS (aunque se puede prescindir de éste y trabajar en coordenadas relativas). Esta técnica presenta múltiples aplicaciones en diversos campos de la ciencia y la tecnología; desde el procesamiento de la materia, conservación del patrimonio cultural, hasta la industria del entretenimiento; pasando, obviamente, por la generación de modelos digitales del terreno (Delacourt, et al., 2007). En este campo, la técnica de láser escáner se ha



empleado en diversos trabajos como análisis de evolución geomorfológica de escarpes (Abellán, et al., 2010) y estudios de desplazamientos en movimientos de ladera (Teza et al. 2008). Para la monitorización de movimientos de ladera se requieren instrumentos de largo alcance (al menos 500-1000 m) y que proporcionen precisiones al menos centimétricas. Es una técnica ideal para taludes y pendientes elevadas, aunque puede ser utilizada para superficies de menor pendiente, aún a costa de realizar un mayor número de escaneos (Palenzuela, et al., 2013). Mediante el TLS se obtiene un modelo digital de superficies (MDS) de una forma relativamente directa, sencilla y rápida. La captura se realiza sobre el terreno; las principales limitaciones son la extensión de la zona a levantar y los ocultamientos de zonas en superficies muy poco inclinadas. En el procesamiento, las principales dificultades son las mismas del LIDAR aerotransportado; la orientación relativa entre tomas y el filtrado de los elementos que no pertenecen al MDT. Sin embargo, el resultado final es muy positivo, ya que permite disponer de un MDS y un MDT de gran precisión y resolución. Por tanto, en los procedimientos de escaneo 3D, generalmente, se realizan múltiples escaneos desde diferentes posiciones con el objetivo de evitar zonas de sombra. Cada una de estas nubes de puntos, estará contenida en el sistema de coordenadas propio de cada posición, y después se realiza la fusión de todas ellas. El proceso completo, desde la adquisición de datos hasta la obtención de la información gráfica es lo que se conoce como “pipeline 3D” (Bernardini & Rushmeier, 2002).

## **Capítulo 3**

### **Materiales**

#### **3.1. Zona de estudio.**

##### **3.1.1. Situación geográfica.**

El deslizamiento está ubicado en la ciudadela “Trigales Altos” al noroeste de la ciudad de Cuenca, en la parroquia Hermano Miguel, en el barrio “Los Trigales” que colinda con los barrios: Patamarca II, el Tablón, El Tablón Chico, Terrenos Une y Cajaloma; aproximadamente en las coordenadas WGS84 UTM 17S 723.351 m 9.682.490,340 m a 2650 msnm (Figura 3-1).

## Área de estudio - Los Triguales Altos

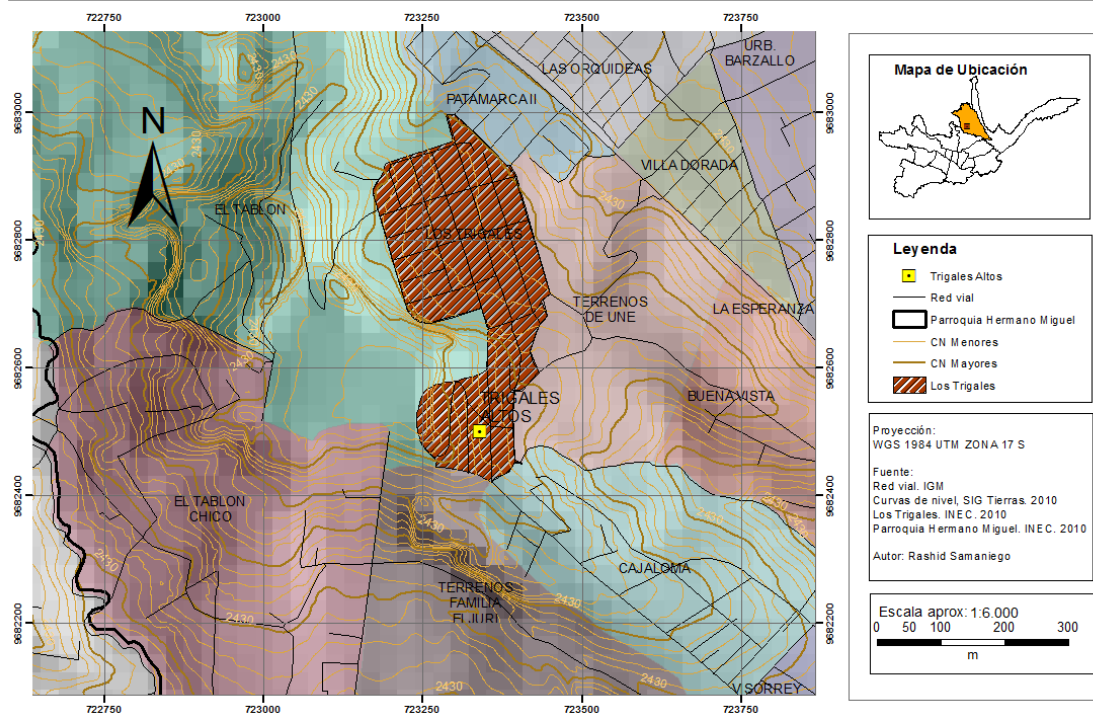


Figura 3-1 Situación geográfica de la zona de estudio.

### 3.1.2. Hidrografía.

En la zona de estudio existen dos cuencas de aporte que drenan sus aguas a dos quebradas designadas como Quebrada: s/n 1 y s/n 2 (Figura 3-2), las cuales pertenecen a la micro cuenca la Campiña que desemboca en el río Machángara.

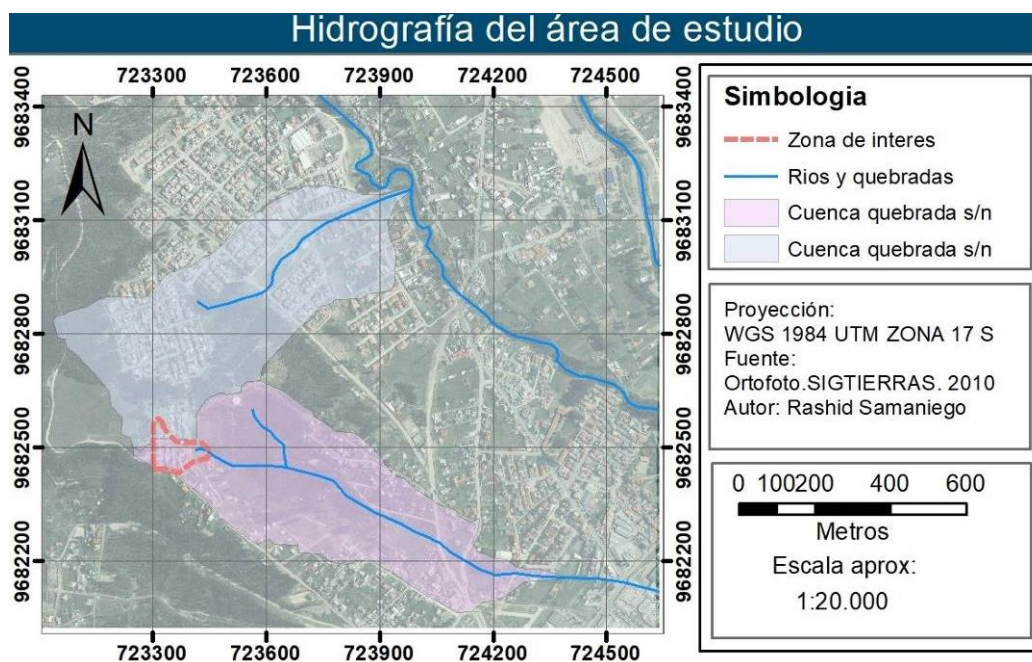


Figura 3-2 Hidrografía del área de estudio.



### 3.1.3. Clima

El área de estudio, al igual que la provincia del Azuay está ubicada en la región climática ecuatorial mesotérmico semi-húmedo (Figura 3-3), es el clima más característico de la zona interandina, presenta unas temperaturas medias anuales entre 12 y 20° C, la humedad relativa esta entre 65% y 85%, existen dos estaciones lluviosas entre los meses febrero a mayo y octubre a noviembre, y fluctúan de 500 y 2000 mm (Pourrut, et al., 1995). La ciudad de Cuenca tiene temperaturas entre 7 a 15 grados centígrados en invierno y 12 a 25°C en verano, su temperatura media oscila en 15°C (FENEFEDIT, 2014).

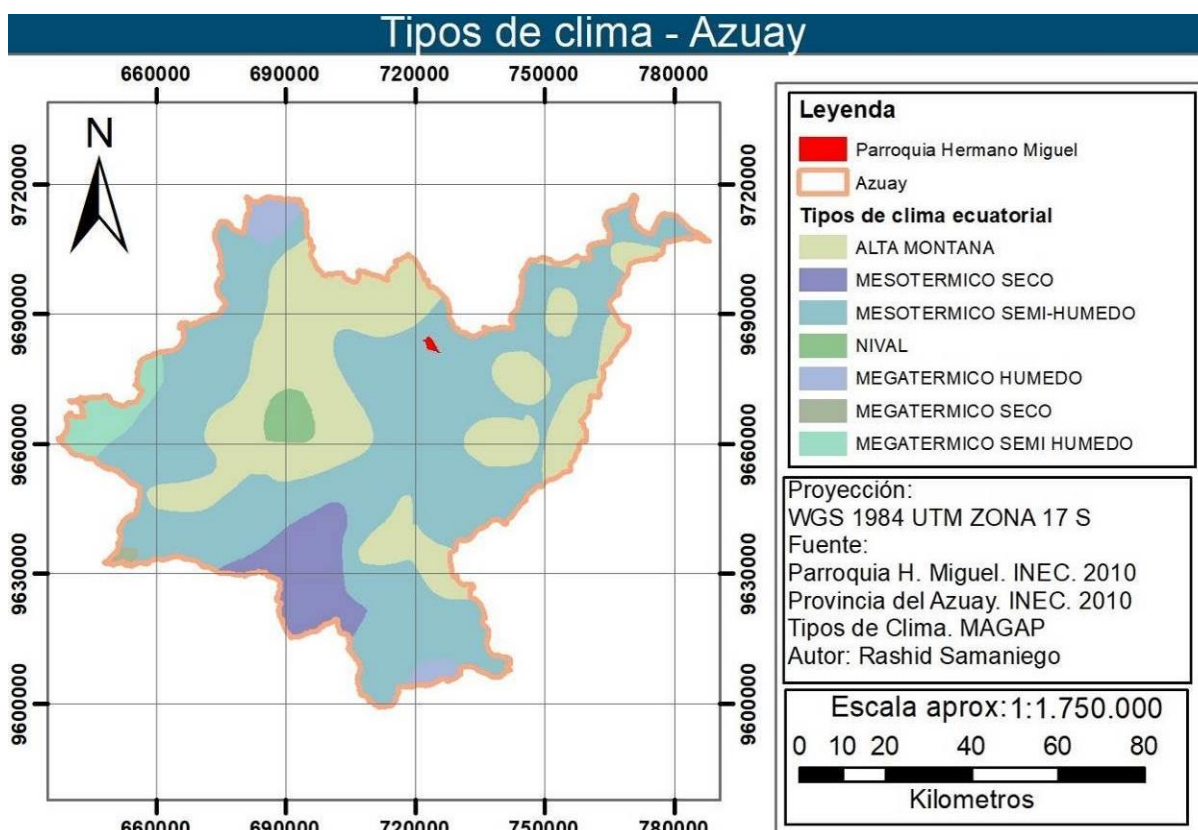


Figura 3-3 Tipos de clima de la provincia del Azuay.

### 3.1.4. Geología regional

En la zona de estudio se encuentra la formación Mangán (Terciario) rodeado por una terraza glacial (Cuaternario) y la formación Santa Rosa (Terciario) ver Figura 3-4.

Según el proyecto PRECUPA (Basabe, P., et al., 1998) finalizado en el año 1998 describe las características geológicas de la siguiente manera:





### **3.1.4.1. Formaciones del Terciario**

#### **3.1.4.1.1. Miembro Santa Rosa (Mr)**

*Litología:* En el miembro Santa Rosa predominan depósitos de clastos gruesos, conglomerados con cantos intrusivos de la cordillera occidental en matriz variada rica en ceniza volcánica con lutitas rojas arenosas y limosas.

*Espesor y tectónica:* Al Mb. Santa Rosa se le atribuye un espesor de 500 m (Bristow, 1980). Forma parte de la serie más joven de la cuenca sedimentaria de Cuenca, poco deformada, posterior a las grandes deformaciones compresivas de hace 9-8 Ma que afectaron a los depósitos más antiguos de la cuenca.

*Edad y génesis:* Las recientes dataciones de trazas de fisión en cenizas intercaladas de la Fm. Turi indican una edad del Mioceno – Tardío que sería similar para el Mb. Santa Rosa. La génesis de las dos se indica como continental con importantes aportes aluviales, así la Santa Rosa sería un cono aluvial de material grueso que se introdujo en los sedimentos de la Fm. Turi.

#### **Comportamiento geotécnico**

*Condiciones geodinámicas.-* Varios deslizamientos involucran al miembro Santa Rosa. Los conglomerados aportan con el peso y la rotura por tracción en la corona de los deslizamientos. El cuerpo falla en los materiales fisibles, poco permeables en condiciones saturadas. Varios deslizamientos de rotura plana tienen como plano de debilidad el tope de estratos arenosos o conglomeráticos duros e impermeables.

*Condiciones estructurales. -* Los conglomerados y areniscas poco alteradas son competentes y poco fracturados (juntas entre 0.5 y 2 m); las areniscas alteradas están muy fracturadas (juntas entre 5 cm y 30 cm) y las lutitas fragmentadas. Las juntas en los materiales competentes son cerradas a abiertas, con caras rugosas; y en los materiales fisibles, abiertas, con rellenos arcillosos, continuas y caras blandas. En lutitas hay microfisuración por desecación.

*Condiciones hidrogeológicas. -* Permeabilidad baja, a media por fracturación. Las lutitas son muy porosas y con baja transmisibilidad. Materiales fragmentados

blandos y porosos pueden presentarse muy húmedos a saturados en el contacto con areniscas o conglomerados duros e impermeables.

Trabajabilidad y posible uso del material. - Fácil a mediana facilidad de excavación con maquinaria pesada. Lutitas sensibles a la humedad, pueden usarse como relleno en mezclas con areniscas duras.

CLASIFIC. SUCS	PARÀMETROS FÍSICO-MECÀNICOS						
	K (m/s)	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	C' (MN/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)	C <sub>u</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	$\phi_u$ (°)	$\sigma_c$ (MN/m <sup>2</sup> )
CL - CH	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-8</sup>	18 - 21	0.01 - 0.03	18 - 22	0.02 - 0.04	7 - 15	
*SC - GW	10 <sup>-4</sup> – 10 <sup>-6</sup>	*19 - 23	*0 – 0.15	*26 - 35	0	-	

\* Valores obtenidos por ensayos efectuados y compilados. El resto estimado a partir de características físicas

CL - CH: *facie fina fisil e incompetente*

SC - GW: *areniscas concrecionada y conglomerado cementados a alterados, con comportamiento similar a material rocoso, parámetros estimados a partir de las características físicas y el índice RMR*

Tabla 3-1 Parámetros físico-mecánicos miembro Santa Rosa (Mr) (Basabe, P., et al., 1998).

#### 3.1.4.1.2. Formación Mangán (Mm)

**Afloramientos:** Aflora extensamente en Cuenca, desde el Sur de Pacchamama, cubiertos ahí por la Fm. Llacao, hacia el Norte pasando por Déleg, hasta el NW de Biblián.

**Litología:** Secuencia de limolitas, lutitas y areniscas finogranulares, en su parte inferior todos de color claro; en su parte media se encuentran lutitas asociadas con vetas de carbón; en la parte superior aflora una arenisca tobácea gruesa café, que se hace conglomerática hacia arriba (Bristow, 1973).

**Espesor y tectónica:** A la Fm. Mangán propiamente dicha se le atribuye un espesor aproximado de 2.200 m., (Bristow, 1980), mientras a la Fm. Turi y el Mb. Santa Rosa un espesor de 700 m.

La Fm. Mangán es la más importante secuencia y la primera de la serie más joven de la cuenca sedimentaria de Cuenca, encontrándose en discordancia con los depósitos antiguos de la cuenca como el caso del contacto con la Fm. Azogues que sufrió grandes deformaciones compresivas de hace 9-8 Ma, sin embargo, la Fm. Mangán fue aún afectada, mostrando ahora ligera deformación y fallamiento.

**Edad y génesis:** Recientemente dataciones de trazas de indican para la Fm. Mangán una edad de inicio del Mioceno – Tardío. El Mismo Autor interpreta su génesis como depósitos continentales deltaicos en sistema fluvial meandriforme distal con planicies de inundación. Los geólogos del Institute of Geological Sciences (Bristow, 1973) habían encontrado ostrácodos en la Fm. Mangán que indicaría ingresiones marino salobres a comprobarse.

### Comportamiento geotécnico

**Condiciones geodinámicas.-** Erosión y movimientos del terreno especialmente al estar expuestas. La saturación de los materiales finos tiene especial importancia, más que la pendiente. La alternancia de estratos competentes e incompetentes favorece el desarrollo de superficies de debilidad.

**Condiciones hidrogeológicas.-** Material poroso pero de baja permeabilidad por su limitación en la transmisibilidad. Niveles freáticos poco profundos generan flujos paralelos sobre contactos duros y concrecionados como el caso de areniscas calcáreas.

**Condiciones estructurales.-** Los materiales incompetentes se presentan fragmentados, con juntas abiertas, bordes blandos y rellenos de arcilla. Los materiales competentes con concreciones calcáreas son medianamente fracturados (10 cm a 1 m), presentando juntas cerradas a abiertas (<3mm) con bordes rugosos, oxidados y blandos. Existe variedad intermedia.

**Trabajabilidad y posible uso del material.** Fácil excavación con maquinaria pesada. Lutitas sensibles a la humedad, pueden usarse en rellenos en mezclas con areniscas.

CLASIFIC. SUCS	PARAMETROS FISICO-MECANICOS						
	K (m/s)	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	C' (MN/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)	C <sub>u</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	$\phi_u$ (°)	$\sigma_c$ (MN/m <sup>2</sup> )
ML - CL	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-8</sup>	* 18 - 21	*0.01 - 0.03	* 18- 26	0.03	7 - 15	
SC	f(cemento)	* 21 - 22	* 0 – 0.15	* 30 - 35	-	-	* 3

\* valores compilados y ensayados, el resto estimados a partir de las características físicas

ML-CL: *facie fina fisil e incompetente*

SC: *facie granular*

*Tabla 3-2 Parámetros físico-mecánicos de la formación Mangán (Basabe, P., et al., 1998).*



*Comportamiento geotécnico en resumen.* - En la Fm. Mangán de alternancia finogranular dura-blanda, predominan los estratos físis (ej. lutitas), en los cuales las condiciones de saturación disminuyen la resistencia al corte hasta la rotura; roturas limitadas por los estratos competentes. Sin embargo, en zonas con predominio de materiales físis, todo el macizo puede estar involucrado en grandes zonas inestables cuando se desarrollan grandes presiones de poros.

### **Susceptibilidad a terrenos inestables**

Alta. Una vez erosionada la cobertura volcánica afloran las formaciones de la cuenca de Cuenca empezando grandes movimientos del terreno en los que contribuyó la Fm. Mangán por sus estratos incompetentes y la sobrecarga. Actualmente permanece la Fm. Mangán susceptible a movimientos del terreno según las condiciones indicadas sobretudo la saturación de sus materiales físis, susceptibilidad que es incrementada por la mala utilización y cortes inadecuados del terreno.

#### **3.1.4.2. Formaciones del Cuaternario**

##### **3.1.4.2.1. Terrazas glaciares (QT<sub>1-5</sub>)**

Depósitos de origen mayormente aluvial. En la zona de Cuenca cubren en extensas áreas planas con cinco diferentes niveles de terrazas, compuestas por potentes capas conglomeráticas de matriz areno-arcillosa distribuidas en las márgenes de los ríos Tomebamba, Yanuncay, Machángara y Tarqui, desde Sayausí (UTM 9683000 714000) hasta El Descanso (UTM 9686000 736200).

El área de aporte es el flanco Este de la Cordillera Occidental y el Norte del Nudo en dirección al Portete de Tarqui. La depositación tuvo lugar durante el período Cuaternario, con incidencia glacial en las zonas altas y medias durante las épocas de glaciación del Pleistoceno. Las relaciones estratigráficas entre los diferentes niveles son poco conocidas.

Las terrazas (t<sub>1</sub>-t<sub>4</sub>) están formadas por bloques y boleos subangulares a redondeados y subesféricos (ocurrencia 40 y 70%) en matriz de grava areno arcillosa (ocurrencia 60 y 30%), la terraza t<sub>5</sub> esta formada por estratos erráticos de arena, limo y depósito aluvial de potencia variada.

Otros sectores como la cuenca del Burgay y del Gualaceo presentan terrazas menos desarrolladas.

### Comportamiento geotécnico

*Condiciones geodinámicas.*- Erosión hídrica por las corrientes superficiales en taludes de corte expuesto. Terrazas de depositación original en general estables; a excepción de sus taludes terminales sujetos a erosión y desprendimientos.

*Condiciones hidrogeológicas.*- Niveles freáticos poco a medianamente profundos. Terrenos generalmente afectados por flujos de agua. Alta permeabilidad de los depósitos. En la terraza  $t_1$  la permeabilidad es alta y los niveles freáticos cercanos. En las terrazas  $t_2$ ,  $t_3$ , y  $t_4$  la permeabilidad es media alta con niveles estáticos superficiales cercanos al pie del talud y hasta mayores de 20 m. de profundidad. En la  $t_5$  la permeabilidad es alta, se mantiene seca a bien drenada con niveles estáticos profundos.

*Trabajabilidad y posible uso del material.*- Mediana dificultad de excavación, pueden ser trabajados con maquinaria liviana. Con dificultad puede trabajarse a mano. Bases de carreteras, lastrado de vías y áridos de hormigón pobre.

*Comportamiento en resumen.* - Depósitos competentes, permeables predominantemente friccionantes, apto para construcción y buen terreno de cimentación. Unidad geotécnica 2 (cuadro B.3) Atención si están expuestos en taludes, tendencia a desprendimientos.

CLASIFIC. SUCS	PARAMETROS FISICO-MECANICOS						
	K (m/s)	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	C' (MN/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)	C <sub>u</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	$\phi_u$ (°)	$\sigma_c$ (KN/m <sup>2</sup> )
1) GW-SW	10 <sup>-4</sup> - 10 <sup>-5</sup>	21 - 22	0	35 - 45	-	-	
2) GW-SW y CL	10 <sup>-4</sup> - 10 <sup>-5</sup>	*19 - 21	0	35	-	-	

Valores compilados y estimados a partir de características físicas

(1) Terrazas  $t_1$  a  $t_4$       (2) Terraza  $t_5$

Tabla 3-3 Parámetros físico-mecánicos terrazas glaciares (Basabe, P., et al., 1998).



### **Susceptibilidad a terrenos inestables.-**

Baja en las terrazas aluviales muy compactas a cementadas, los taludes naturales son estables en pendientes bajas, excepto desde el quiebre de pendiente entre terrazas o hacia los cauces naturales y cortes de talud, donde puede producirse socavación e inicio de inestabilidad con caída de bloques y desprendimientos. Las terrazas en general son competentes, pero en los pocos casos de deslizamientos conocidos las principales causas son geológicas (rotura de formaciones arcillosas saturadas a la base) y morfológicas (erosión en el pie del talud y mayor pendiente al borde de terrazas).

Las pendientes naturales son estables hasta los  $29^{\circ}$ , pero pueden soportar taludes en corte casi verticales de hasta 25 m. de altura. Sin embargo, atención con el descalce y desprendimientos cercanos al talud. Un talud recomendable es en general 1/3 (H/V) y el uso de bermas.

En las zonas de mayor incidencia fluvio glacial, las características del material son similares a las terrazas que permite considerarlos como de baja susceptibilidad de rotura.

Como las terrazas tienen su principal inestabilidad hacia los taludes del borde, se debe desarrollar la cultura de tratamiento de taludes, uso de cortes adecuados, bermas, control de drenaje superficial con cunetas, plantación de vegetación nativa y arbustos, así como delimitación de fajas de seguridad, etc. En casos especiales se requerirá de muros de sostenimiento.

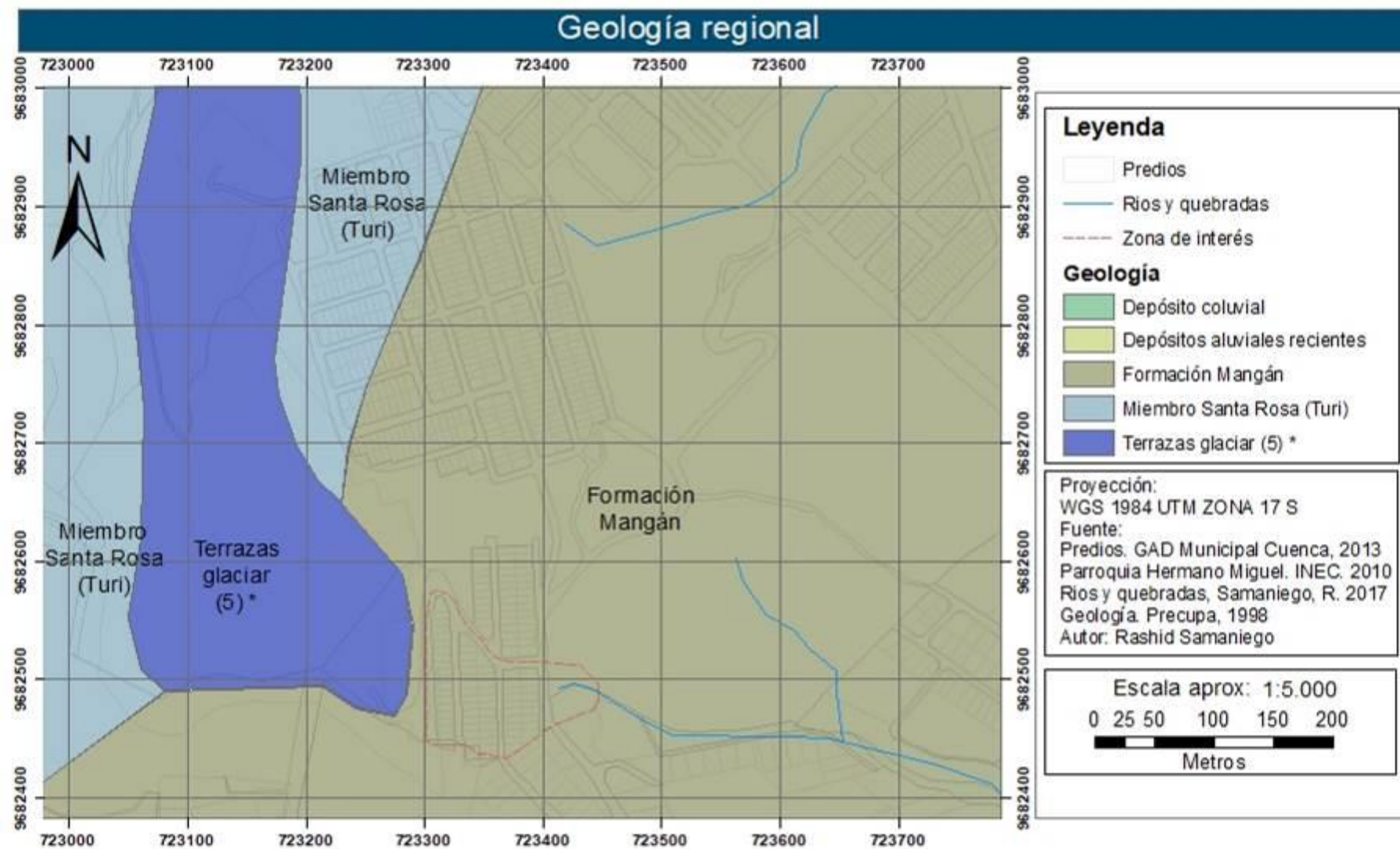


Figura 3-4 Geología regional de la zona de estudio.





### **3.1.5. Geología local**

Según en los Estudios de Perforaciones y Resistividad Eléctrica para la Ciudadela Los Trigales y áreas aledañas (Tecnosuelos, 2006) la geología de la zona se distribuye como se observa en la Figura 3-5 y explica que:

#### **3.1.5.1. Formación Santa Rosa**

En la zona de las urbanizaciones Trigales Alto y Bajo, Patamarca y Orquideas, yace inclinada entre 10 y 15 grados hacia el este, la serie de areniscas y arcillas de la Formación Santa Rosa. Estos depósitos representan la continuación de la sedimentación de la Formación Mangán iniciada en el tiempo del Mioceno Superior. Probablemente la sedimentación se prolongó hasta el Plioceno formado las capas que afloran actualmente en el área de nuestro estudio.

Las areniscas son de grano fino a grueso, localmente microconglomeráticas, con guijarros de cuarzo lechoso, lítico volcánicos y algunos lutita roja. Son ricas en feldespato sódico caolinizado y cuarzo, minerales que se encuentran insertos en una matriz tobácea más fina parcialmente argilizada. Son por lo general de color gris claro con tinte verdoso en presentaciones frescas y suelen estar manchadas por oxidaciones ocreas o rojas en presentaciones meteorizadas. Se observa una estratificación cruzada y grado de selección vertical. Son por lo general masivas, compactas, duras, ligeramente húmedas, y exhiben diaclasas sub-verticales métricas. En algunos niveles se ha observado una ligera cementación calcárea. Su porosidad y permeabilidad se encuentra fuertemente disminuida por la agilización que ha sufrido la matriz tobácea. Son lateralmente extensas con espesor constante y uniforme. Sus espesores característicos varían entre 1 a 3 metros, pero algunos bancos alcanzan los 5 metros de espesor.

Las arcillas son limosas y localmente arenosas, de color gris verdoso a crema en exposiciones grescas y manchadas, a veces intensamente, por oxidaciones ocreas y rojas. Su estructura interna es estratificada a masiva. Se presentan compactas, homogéneas, húmedas sin llegar a estar saturadas y a menudo contiene cristales de feldespato argilizado dispersos. Los taludes en corte practicados en estos niveles arcillosos se observan desmoronados, debido a la deshidratación y contracción que sufre la arcilla expuesta a la intemperie. Esto



hace vulnerables a los taludes pues los estratos duros de arenisca están sujetos a desplomes por la socavación de los estratos blando de arcilla inferiores. Las capas de arcillas son lateralmente continuas y extensas. Sus espesores característicos varían entre 0.5 y 2 metros.

Aun cuando no se ha hecho un análisis químico de estas arcillas, estas parecen ser de tipo tome en cuenta esta propiedad desventajosa de las arcillas, al igual que la estructura de los macizos formados por esta alternancia de capas vulnerables de arcillas y capas estables de arenisca.

La monótona y cíclica alternancia de arena/arcilla ha congelado en estas rocas los ciclos de sedimentación estacional ocurridos en la época de su génesis. La uniformidad en su composición lleva a pensar en una fuente litológicamente uniforme para estos sedimentos y la recurrente uniformidad en el espesor de las capas lleva a suponer la variación estacional del clima en el entorno de aquella época era uniforme y regular.

#### **3.1.5.2. Terraza glaciar (5)**

Sobre la formación Santa Rosa yace, con discordancia angular, una gruesa terraza de 35 metros de espesor compuesto de grava arenosa medianamente consolidada. Este depósito es masivo, de textura homogénea, groseramente estratificado y ligeramente inclinado hacia el Oeste. Entre los guijarros abundan los de origen sedimentario, pero también los descompuestos. Un delgado suelo edáfico de color negro se ha formado a su techo. La matriz es una arena angulosa, muy gruesa, algo deleznable que llega a componer un 30% del depósito.

Los taludes practicados en este sedimento son muy vulnerables a la erosión hidráulica linear. Esta unidad es muy porosa altamente permeable.

#### **3.1.5.3. Depósito Coluvial**

La terraza fluvial anteriormente descrita forma una mezcla de borde abruptos. Al desestabilizarse estos bordes, en el pasado geológico se produjeron desplomes, deslizamientos y flujos de barro que alimentaron depósitos coluviales



acumulados al pie de estos barrancos y que tapizaron la infrayacente formación Santa Rosa.

El coluvión tiene estructura caótica y está compuesto por una matriz arcillo arenosa, húmeda y blanda con guijarros duros dispersos en ella. La matriz constituye un 80% del depósito. El coluvión inicialmente pudo contener mayor cantidad de guijarros y arena, pero estos fueron fuertemente meteorizados y argilizados in-situ debido al clima húmedo que reinaba en aquella época localmente.

Sobre el depósito coluvial se desarrollaron al menos dos horizontes de suelo orgánico negro, uno de los cuales fue eventualmente sepultado por un nuevo coluvio.

#### **3.1.5.4. Suelo Orgánico**

En el subsuelo de la urbanización Los Trigales Alto, inmediatamente debajo de calles y casas, se encuentra un suelo orgánico blando, de composición arcillosa, de color negro y que contiene guijarros duros dispersos en su matriz. En este suelo negro se presenta en dos niveles de 1.50 m cada uno, intercalados por un delgado estrato coluvial de color café compuesto de arena con guijarros duros.

El espesor del conjunto, suelo negro-coluvial-suelo negro, varía entre los 2 y 4 metros. Su distribución es más o menos uniforme a lo largo y ancho de la urbanización. Los Trigales Alto. El nivel de suelo orgánico inferior pasa transicionalmente a un grueso horizonte de arcilla café o crema con guijarros, y donde este horizonte se ha consumido por la pedogénesis, pasa directamente a los estratos de la formación Santa Rosa.

La génesis de este suelo puede ser comprendida por la actividad biótica de la flora y fauna que vivía en el sitio, en el cual reinaba un ambiente húmedo y frío. Esta actividad biológica ha “digerido” el techo de la capa coluvial subyacente y ha integrado en su matriz los duros guijarros residuales. El estrato coluvial que se observa en las fotos, y que interrumpe temporalmente la pedogénesis, representa un evento de erosión que provino del depósito de grava ubicado en el respaldo de la urbanización.

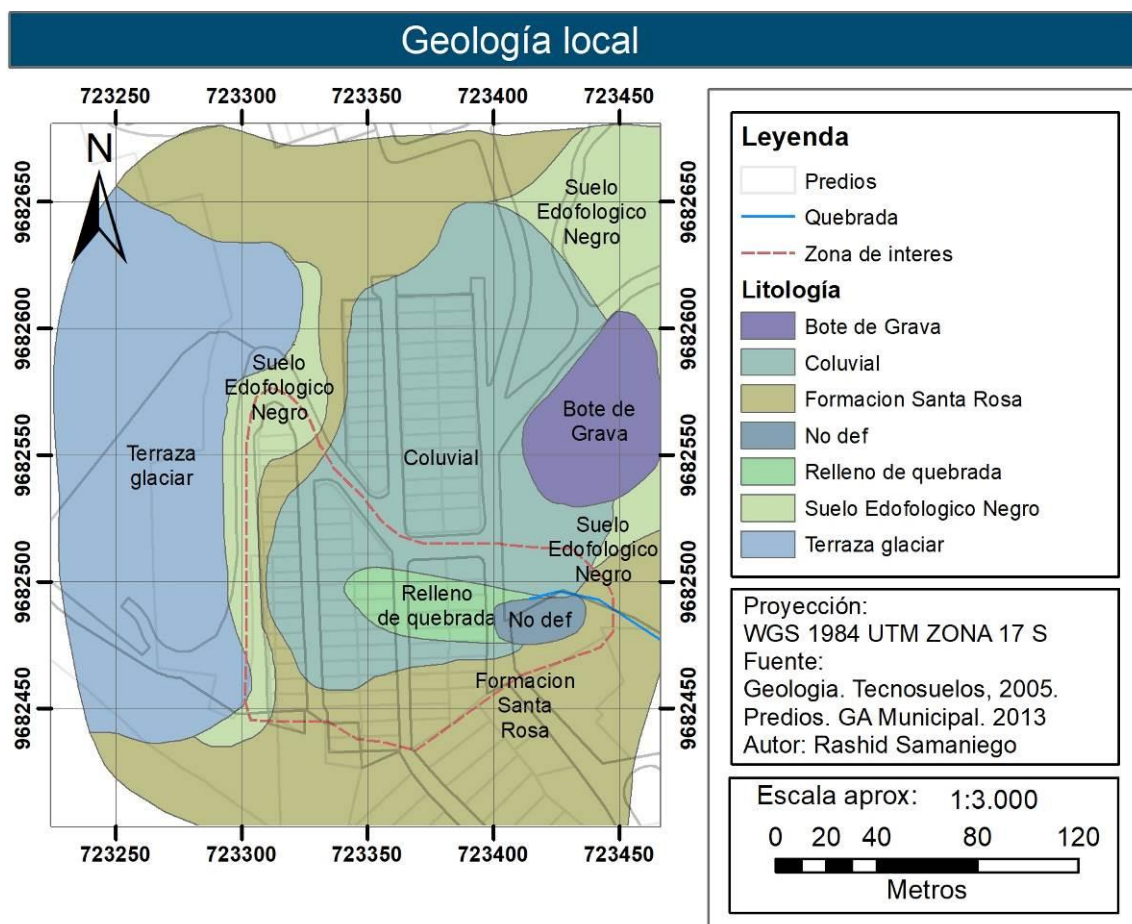
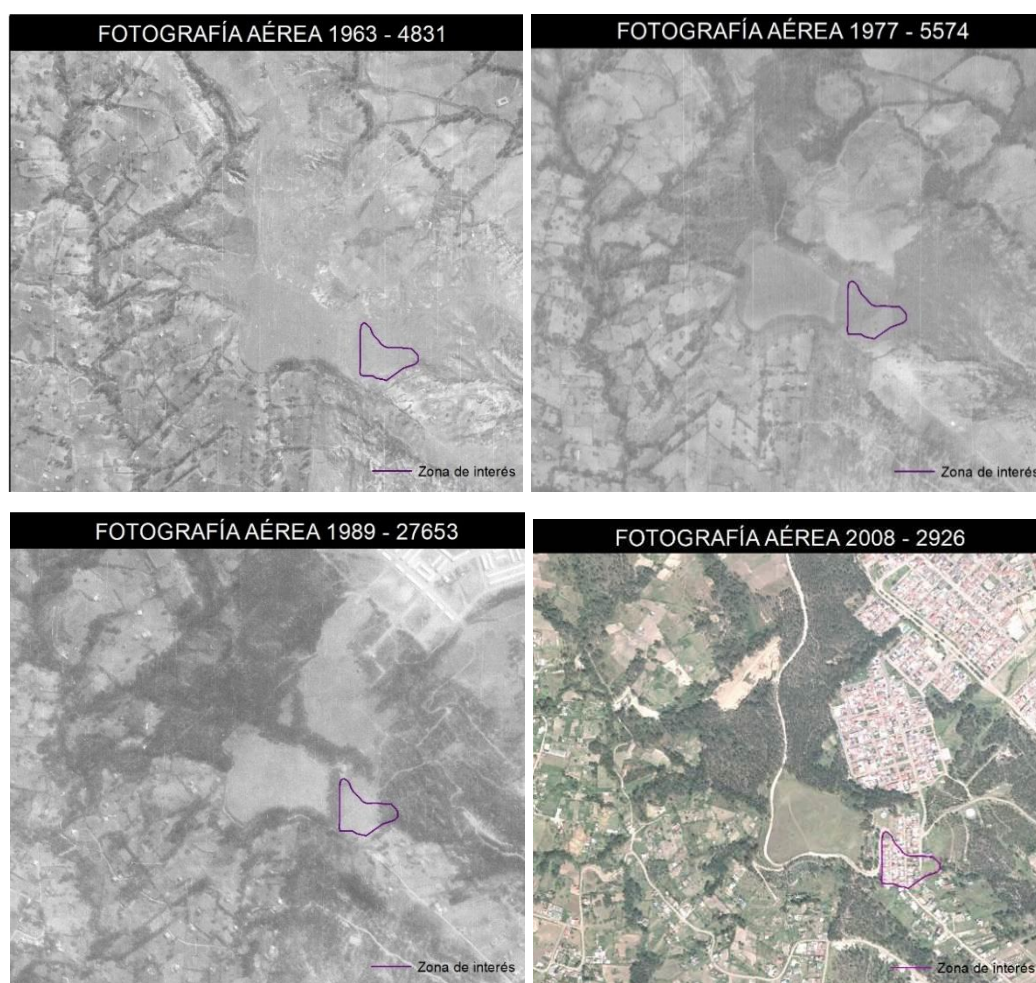


Figura 3-5 Geología local, Triguales Altos.

### 3.1.6. Geomorfología

La morfología actual de la zona de estudio está condicionada por cambios antrópicos, en el año de 1992 fue aprobado el proyecto para la construcción de la Urbanización Triguales Altos correspondiente a un programa de viviendas de interés social y fueron construidas en su totalidad el año 1995 (Gestion de Riegos, 2015). En estudios previos como el de Tecnosuelos (2006) se indica que en la zona afectada existe un relleno de una quebrada de 15 m de profundidad. Sin embargo, en el análisis geomorfológico realizado en esta tesis el análisis de fotografías aéreas de los años 1963, 1977, 1889 y 2008 (ver Anexo 2, Anexo 3, Anexo 4 y Anexo 5) con estereoscopio, así como el mapa topográfico de 1980 de la zona a escala 1:1000, no se ha identificado ninguna quebrada que represente un relleno de la profundidad que explica el estudio de Tecnosuelos (2006).



*Figura 3-6 Fotografías aéreas de la zona de estudio*

La pendiente aproximada de la zona de estudio es de unos  $10^\circ$  presentando taludes de  $70^\circ$  (Figura 3-7). En los alrededores del sector existen árboles, principalmente eucaliptos, que tienen el tronco recto y vertical (Figura 3-8). En la Figura 3-9 se puede observar claramente en la ortofoto del 2010 y la fotografía satelital de Google en 2017 en donde la deformación de las calles y los daños estructurales de la vivienda denotan un cambio de la superficie considerable



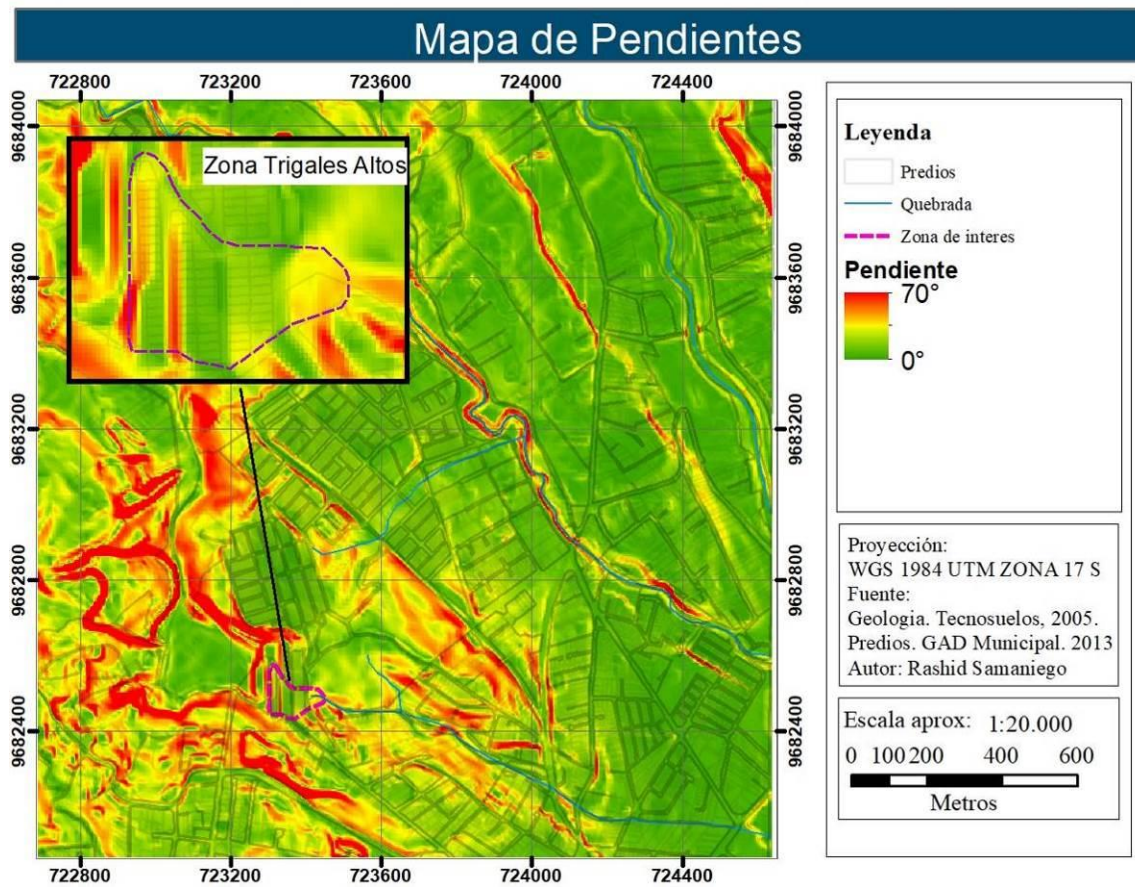


Figura 3-7 Mapa de pendientes.



Figura 3-8 Zona inferior del área de estudio, troncos verticales de árboles de la zona baja y alta.



Figura 3-9 Izquierda: ortofoto (Sigtierras,2010). Derecha: imagen satelital (Google,2017)

### 3.1.7. Sismicidad

De acuerdo al mapa de máximas intensidades sísmicas del Ecuador (Figura 3-10) (Singaucho, 2009), en la zona de la ciudad de Cuenca la aceleración sísmica pico puede alcanzar valores que se encuentran entre 4.5-8.9 % g ( $g$ =gravedad,  $9.81 \text{ m/s}^2$ ), al relacionarlo con la escala de Mercalli modificada los daños son muy leves en edificios e infraestructuras al relacionarlo con la escala de Mercalli modificada lo que representa un potencial daño, aunque muy leve, en edificios e infraestructuras. La Norma Ecuatoriana de Construcción dividió al Ecuador en 6 zonas según la peligrosidad sísmica esperada. A cada zona se asignado un valor de factor de zona ( $Z$ ), que define la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño y se encuentra expresado como función de la aceleración de la gravedad. El mapa de zonificación sísmica para diseño (Figura 3-11) proviene del resultado del estudio de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años (periodo de retorno 475 años), que incluye una saturación a 0.50 g de los valores de aceleración sísmica en roca en el litoral



ecuatoriano que caracteriza la zona VI (MIDUVI, 2015). Para la ciudad de Cuenca el factor es de 0.25g.

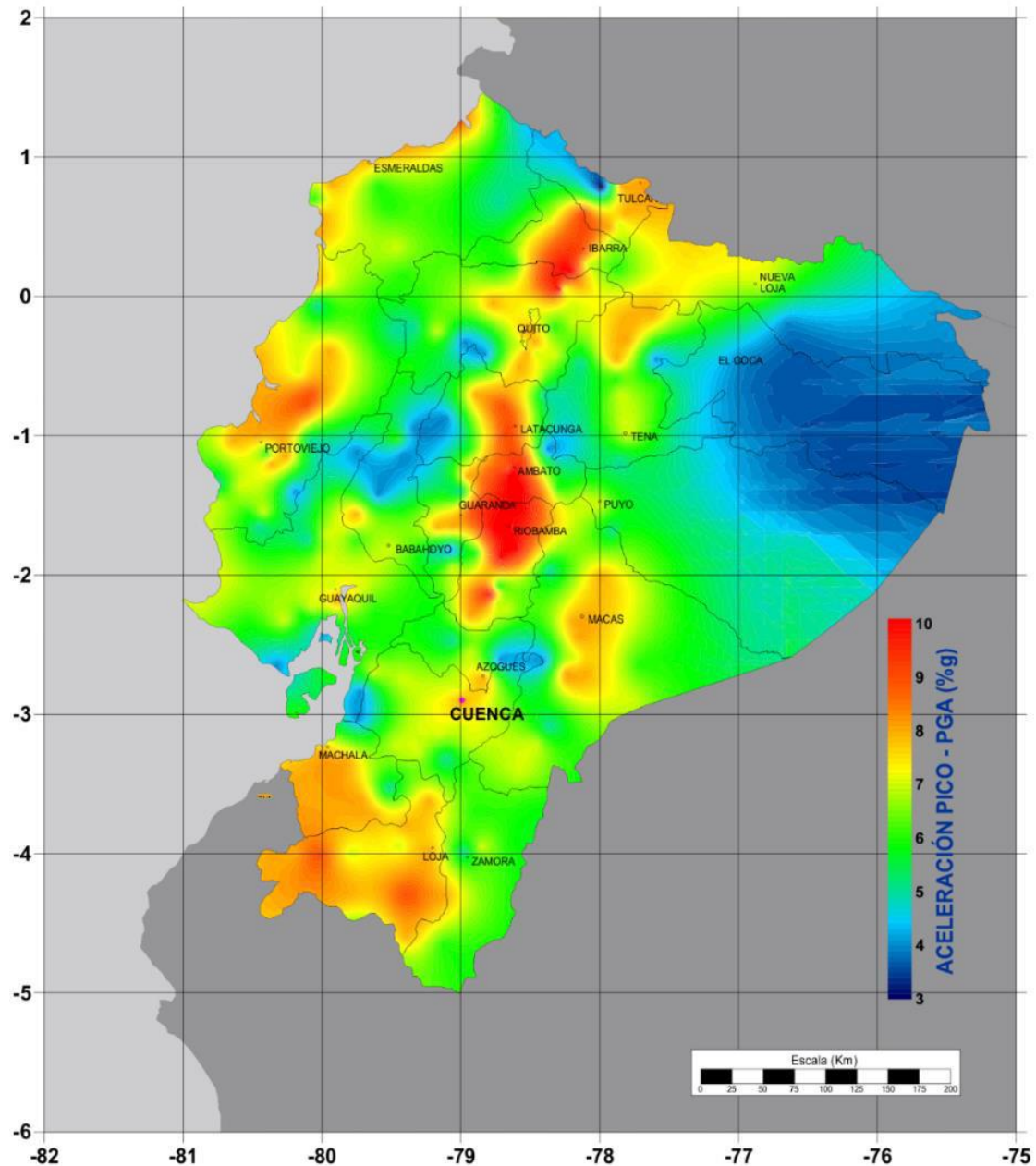


Figura 3-10 Mapa de máximas intensidades sísmicas del Ecuador (Singaicho, 2009).

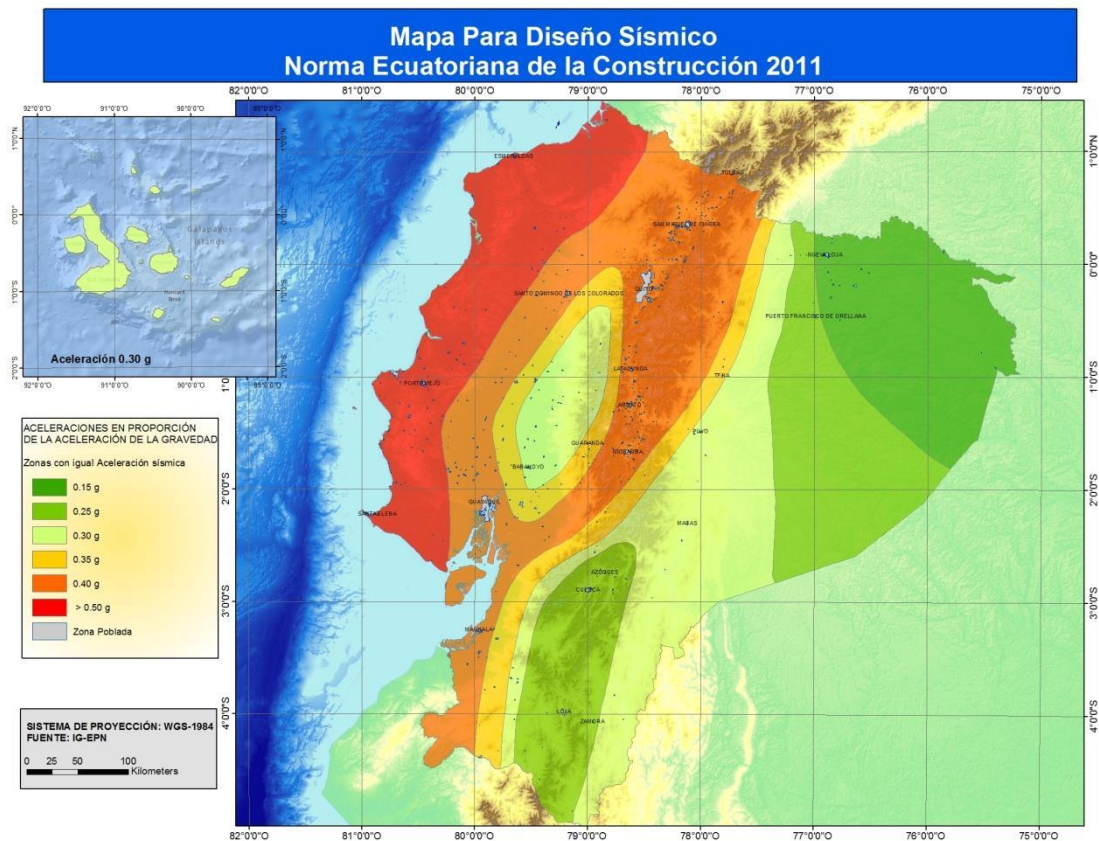
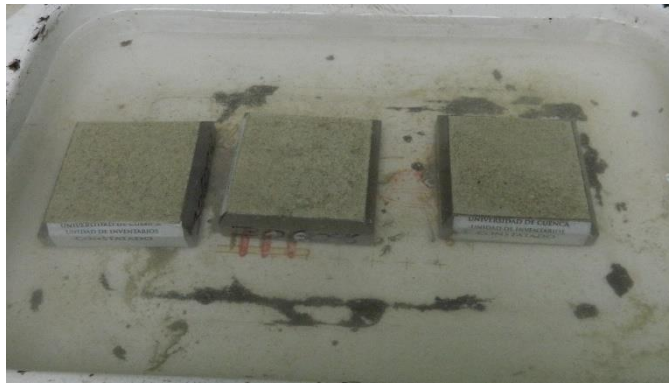


Figura 3-11 Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z.

### 3.1.8. Hidrogeología

El suelo de la zona de estudio está compuesto por estratos de arcilla correspondientes a las formaciones Loyola y Mangán. Con la infiltración de agua, las arcillas aumentan el volumen (Figura 3-12), se podría decir que la urbanización “Trigales Altos” está asentada sobre estratos de arcillas expansivas. Por lo tanto, la zona puede estar afectada por asentamientos diferenciales por expansión- contracción.



Moldes sumergidos en agua



24 horas después

*Figura 3-12 Muestra de suelo extraídas parte baja de la zona de estudio.*

### 3.1.9. Acciones antrópicas.

Según moradores de la zona explican que se evidenció un gran deslizamiento en el año 2000, que el proyecto de urbanización “Trigales Altos” en su inicio eran casas de interés social de un piso y conforme paso el tiempo, varios propietarios empezaron a levantar un segundo piso. Se cree que el aumento de carga que supone la ampliación de los edificios pudo contribuir a la desestabilización de la ladera, la urbanización fue construida en el año de 1992 y 8 años después se dio primer deslizamiento, fecha que lo confirma el informe técnico realizado por gestión de riesgos en el año 2015. Conforme el paso del tiempo las carreteras han sufrido arreglos a medida que el terreno se ha ido deformando.

### 3.1.10. Edificaciones en mal estado.

En la zona de estudio existen una totalidad de 66 predios en los cuales hay 5 terrenos baldíos, se identificaron 37 edificaciones con afecciones estructurales de estas, 12 están demolidas completamente, 2 aún están habitadas y en 23 viviendas se han detectado movimientos. Según el informe técnico del estado actual de la urbanización: “Trigales Altos” (Gestion de Riegos, 2015) los habitantes de 22 fueron reubicados.





*Figura 3-13 Edificaciones en mal estado parte media de la zona de estudio.*



*Figura 3-14 Edificación con agrietamiento habitada en la parte media del deslizamiento.*

### **3.1.11. Modelo digital de terreno y ortofoto.**

El departamento SIGTIERRAS del ministerio de agricultura y ganadería tiene a disposición del público ortofotografías y Modelos Digitales de Terreno (MDT) que cubren una gran parte de la superficie del Ecuador; el MDT y Ortofoto que abarca la zona de estudio corresponde a la cuadrícula ÑV-E3a-A3 (ver *Anexo 1*) con una resolución de 3 m y 30 cm respectivamente.

### 3.2. Estación total



*Figura 3-15 Estación total, espejo y trípode.*

La estación total es un instrumento de alta precisión utilizado frecuentemente en el monitoreo de deslizamientos (Bertacchini et al., 2009; Calcaterra et al., 2012; Coe et al., 2003; Gili, et al., 2000; Malet, et al., 2002; Moss, 2000; Rizzo, 2002; Tagliavini, et al., 2007), la precisión del equipo depende mucho de la experiencia del operador y cadeneros. Para el levantamiento realizado se utilizó una estación total de marca Ruide RTS822d con dos segundos de precisión, con interface para comunicaciones estándar, su memoria interna permite registrar hasta 10000 puntos, medición electrónica de distancias de 2000 metros con un prisma en condiciones atmosféricas favorables con una resolución de 0.001 m y una aproximación de  $\pm 2$  mm, corrección interna de la refracción y curvatura de la tierra seleccionable, corrección atmosférica y constante del prisma.

### 3.3. Escáner láser terrestre

Existen dos tipos de TLS: basados en el tiempo de vuelo del láser y basados en el desfase de ondas, el segundo tipo que es el que corresponde al modelo del TLS FARO Focus3D X130 y tienen las siguientes características generales:

- El escáner emite un láser en forma de onda que se refleja en el objeto escaneado y se compara el desfase entre la onda de salida y la rebotada.
- $\text{Tiempo de vuelo} = (\text{Desfase}) / (2 * \text{frecuencia de onda})$
- $\text{Distancia} = (\text{velocidad de la luz}) * (\text{tiempo de vuelo}) / 2$
- Captura cientos de miles de puntos por segundo.
- Rango de distancia de trabajo: 0.6 m - 350 m. Para llegar más lejos el láser debería ser peligrosamente potente, pero a mayor longitud de onda disminuye la precisión y aumentaría el ruido.

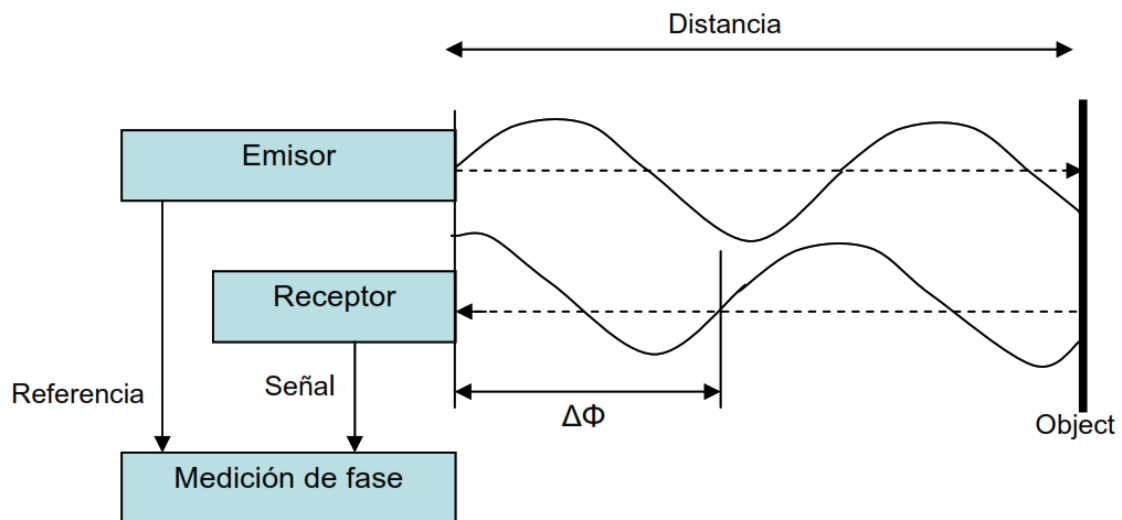


Figura 3-16 Principio de medición basado en la fase.

Los TLS ya descritos anteriormente sirven de gran utilidad en levantamientos de puntos, el avance tecnológico nos permite contar con equipos de alta calidad y velocidad al momento de levantar datos. El escáner usado es FARO Focus3D X130, el cual, sus características específicas son:

- Velocidad de hasta 976 000 puntos de medición por segundo.
- Diseño ultra portátil lo cual permite la movilización y la disminución de uso de equipos externos.

- Sus dimensiones son de 24x20x10cm y con un peso de 5.2Kg.
- Su escaneo tridimensional cuenta con un cámara a color integrada con superposición automática de color sin paralelaje que complementa un realismo fotográfico.
- Su alcance es de 130 m.
- Tiene integrado sensor de nivel, GPS, brújula, red de área local inalámbrica (WLAN) y pantalla táctil.
- Rango de error es de  $\pm 2$  mm



*Figura 3-17 levantamiento en la zona de interés con el escáner FARO Focus3D X130.*

### **3.4. ArcGIS**

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) nos permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica para resolver problemas, tomar decisiones, planificar adecuadamente y utilizar los recursos adecuadamente. ArcGIS es un SIG que tiene un paquete de herramientas que nos permite análisis basados en localización, para este proyecto hemos utilizado la herramienta ArcMap con la cual hemos creado modelos digitales de terreno y sus derivados.





### **3.5. AutoCAD Civil 3D 2017**

Autocad es una herramienta muy útil en el desarrollo de diseño de sitio, diseño urbanístico, carreteras, movimiento de tierras, calculo topográfico, replanteo de información, etc. La facilidad de manejo en 2D y 3D este software aporato de varias maneras en el estudio, la herramienta de “Point cloud” la nos permite visualizar un conjunto de puntos como imágenes fotorrealistas tridimensionales obtenidos mediante artefactos como el TLS. Mediante el manejo de nube de puntos se puede crear perfiles del terreno de los diferentes levantamientos y compararlos entre sí. Debido a la alta densidad de puntos, la capacidad del software y computador se necesitó una disminución de la cantidad de puntos.

### **3.6. ArchiCAD**

ArchiCAD es un software CAD de Modelado de Información de Construcción (BIM , Building Information Modeling) la que nos permite trabajar fácilmente en 3D y 2D a la vez. Este programa permite construir edificaciones de forma sencilla y rápida con elementos constructivos virtuales como paredes, techos, puertas, ventanas y muebles; una gran variedad de pre-diseños y objetos personalizables vienen con el programa. La herramienta “importar nube de puntos” ofrece visualizar y trabajar directamente en la construcción del modelo BIM conjuntamente con la nube de puntos levanta con el equipo TLS.

### **3.7. Rocscience - Slide 5.00.**

Slide es un programa que ofrece un análisis completo de la estabilidad de pendiente, introduce el análisis de aguas de subterráneas de elementos finitos, reducción rápida, sensibilidad y análisis probabilístico. Su facilidad de creación de terraplenes, presas de tierra y muros de contención permiten analizar el factor de seguridad de manera eficaz, complementando la importación de perfiles prefabricado en las distintas herramientas CAD con las diferentes características mecánicas de la estratigrafía del terreno, enlazando así también el uso de SIG.

### **3.8. Scene**

Scene es un software diseñado específicamente para los escáneres laser FARO, aunque también es posible usar con equipos de terceros. Scene nos permite



procesar y administrar datos de manera eficiente y sencilla, emplea el reconocimiento automático de los objetos, registro de escaneos y posicionamiento. Posee una interfaz de fácil manejo y además nos permite visualizar los escaneos en 3D durante el registro de los mismos. Para el correcto funcionamiento el fabricante nos recomienda usar un computador con los siguientes requisitos:

Procesador: Intel Core i7/ Xeon, 4 physical cores

Tarjeta Gráfica: OpenGL 4.1, 4GB de memoria

RAM: 64GB

Disco Duro: 512 GB unidad de estado sólido ( Interfaz M.2 PCIe) + Regular HDD

Sistema Operativo: Microsoft 7, 8 , 8.1, 10 ( 64-bit)

Resolución de pantalla: 1920 x 1080

En el caso de que no se necesite del escáner laser una resolución mayor a  $\frac{1}{4}$ , o el tamaño del proyecto sea inferior a 10 escaneos, podremos trabajar con estos requisitos mínimos:

Procesador: Intel Core i7/Xeon, 8 physical cores

Tarjeta Gráfica: OpenGL 4.1, 2GB de memoria

RAM: 16GB

Disco Duro: 256 GB unidad de estado sólido

Sistema Operativo: Microsoft Windows 7, 8, 8.1, 10 (64-bit)

Resolución de pantalla: 1366 x 768

### **3.9. CloudCompare**

CloudCompare es un software libre que nos proporciona un conjunto de herramientas básicas para editar y renderizar manualmente nubes de puntos 3D. La facilidad de manejo de nube de puntos acompañado de una fácil y optima configuración de la visualización de los modelos tridimensionales, CloudCompare en el presente estudio nos permitió lo siguiente:

- Eliminar ruido de los diferentes escaneos.



- Editar y borrar objetos (Carros, personas, vegetación, etc.).
- Crear ortofotos.
- Comparar distancias.
- Referenciar escaneos.
- Crear perfiles del terreno.
- Extraer nubes de puntos de perfiles de terreno.

### **3.10. Hardware**

El análisis de nube de puntos se ha manejado hace varias décadas atrás, progresivamente ha variado y avanzado conjuntamente con la electrónica, últimamente con el avance tecnológico los nuevos equipos de levantamiento de información necesitan ir acompañados de computadoras potentes para el proceso y que rinda a su máxima capacidad, caso contrario se debe bajar la capacidad acorde al equipo disponible. Para el desarrollo de esta tesis se usó un computador de gama media teniendo las siguientes características.

Procesador: AMD A10-6800K APU with Radeon(tm) HD Graphics, 4100 Mhz, 2 procesadores principales, 4 procesadores lógicos

Memoria física (Ram): 2x Kingston Value RAM 8GB 240-Pin DDR3 SDRAM DDR3 1600 (PC3 12800) Desktop Memory Model KVR16N11/8.

Disco duro: Western Digital Caviar Blue WD3200AAJS 320GB 7200 RPM 8MB Cache SATA 3.0Gb/s 3.5" Internal Hard Bare Drive.

Tarjeta gráfica: Nvidia GEFORCE 2 Gb DDR3 GT710.

## **Capítulo 4**

### **Métodos.**

#### **4.1. Análisis tridimensional de nubes de puntos.**

El análisis se realizó mediante la medición del cambio de la cota y desplazamiento horizontales del terreno y las estructuras de la zona a lo largo de cuatro perfiles de nube de puntos. También se analizaron de manera



individual viviendas con deformaciones significativas, todo esto se obtuvo luego de realizar los siguientes procesos:

#### **4.1.1. Levantamiento de nubes de puntos**

El presente estudio cuenta con 3 levantamientos realizados en diferentes fechas, en todos se utilizó el equipo FARO Focus 3D 130X configurando de manera diferente cada uno según las condiciones presentadas al momento de escanear. En la Figura 4-1 se muestra las opciones del escáner de la resolución y calidad de escaneo, la resolución controla la cantidad de puntos del escaneo desde 1/1 hasta 1/32 y la calidad nos permite reducir el ruido, pero a la vez aumenta el tiempo de escaneo disminuyendo así su eficacia. Los detalles sobre las diversas configuraciones de calidad se muestran en la Tabla 4-1. Para generar un modelo tridimensional de puntos se puede realizar varios escaneos desde diferentes puntos en la zona donde se realiza el levantamiento y luego registrarlos uno a uno para lograr unir en una sola nube de puntos, para el registro de los escaneos se necesita tener mínimo 3 objetivos, entre ellos el fabricante nos ofrece los siguientes: tableros cuadriculados y esferas de referencia de 145 mm, para un funcionamiento óptimo los objetivos no deben estar alineados, tener distancias mayores a 1 metro entre sí, estar a diferentes niveles y no tener las mismas distancias con relación al escáner; dependiendo de la resolución los objetivos se deben ubicar a una distancia máxima, por ejemplo: al escanear con una resolución de  $\frac{1}{4}$  y usar esferas de un diámetro de 145 mm, la distancia al escáner puede extenderse a 20 m; y al utilizar referencias de tablero cuadriculado A4 y escanear con una resolución de  $\frac{1}{4}$ , la distancia al escáner no debe superar los 15 metros.

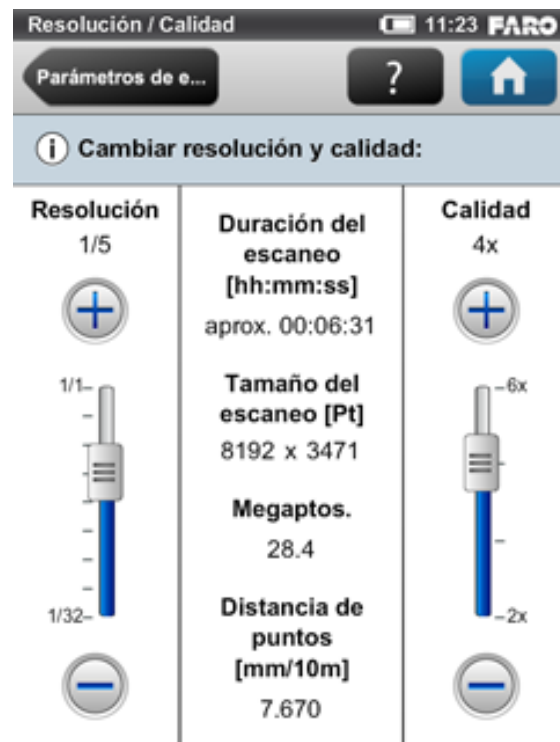


Figura 4-1 Configuración de calidad y resolución del escaneo.



Figura 4-2 Hitos para monitoreo.

Al realizar 3 levantamientos en diferentes fechas se necesitaron puntos de control, distinguiendo entre estáticos situados fuera de la zona deslizada, y dinámicos situados sobre la masa deslizada, cada uno se monitoreo mediante estación total; se utilizaron tubos de PVC de 2 pulgadas y 80 cm de largo, se

cavaron orificios de 10x10x60 cm en el terreno y se rellenaron de hormigón; en la parte más próxima al centro del hito se colocó un clavo como punto de referencia para monitorear con el mínimo error posible, para poder obtener la referencia en el modelo tridimensional de puntos se colocaron lonas cuadriculadas en blanco y negro tomando como referencia su centro gravedad y el clavo en el hito. En la Figura 4-2 se muestra como se colocaron los hitos y las lonas de referencia durante un escaneo.

Resolución		Calidad	Velocidad (kpt/seg.)	Compresión de ruido	Tiempo de escaneo neto (escaneo completo)	pt/360°
Millón de ptos. (escaneo completo)						
710,7	1/1	1x	976	-	0:14:19	40,960
710,7	1/1	2x	488	-	0:28:38	40,960
710,7	1/1	3x	244	-	0:57:16	40,960
710,7	1/1	4x	122	-	1:54:32	40,960
177,7	1/2	1x	976	-	0:03:35	20,480
177,7	1/2	2x	488	-	0:07:09	20,480
177,7	1/2	3x	244	-	0:14:19	20,480
177,7	1/2	4x	122	-	0:28:38	20,480
177,7	1/2	6x	122	2x	1:54:32	20,480
44,4	1/4	1x	976	-	0:00:54	10,240
44,4	1/4	2x	488	-	0:01:47	10,240
44,4	1/4	3x	244	-	0:03:35	10,240
44,4	1/4	4x	122	-	0:07:09	10,240
44,4	1/4	6x	122	2x	0:28:38	10,240
44,4	1/4	8x	122	4x	1:54:32	10,240
28,4	1/5	2x	488	-	0:01:09	8,192
28,4	1/5	3x	244	-	0:02:17	8,192
28,4	1/5	4x	122	-	0:04:35	8,192
28,4	1/5	6x	122	2x	0:18:20	8,192
11,1	1/8	2x	488	-	0:00:27	5,120
11,1	1/8	3x	244	-	0:00:54	5,120
11,1	1/8	4x	122	-	0:01:47	5,120
11,1	1/8	6x	122	2x	0:07:09	5,120
11,1	1/8	8x	122	4x	0:28:38	5,120
7,1	1/10	3x	244	-	0:00:34	4,096
7,1	1/10	4x	122	-	0:01:09	4,096
7,1	1/10	6x	122	2x	0:04:35	4,096
7,1	1/10	8x	122	2x	0:18:20	4,096

Tabla 4-1 Resolución y calidad (Faro, 2011).



#### 4.1.1.1. Primer levantamiento.

El día 16 de diciembre del 2016 se realizó la mitad del primer levantamiento y al siguiente día se completó un total de 8 escaneos, ubicados entre sí a una distancia media de 18.8 m y desviación de 8.6 m, la distancia máxima fue desde el escaneo 1 al 2 con 29.1 m y la mínima del escaneo 3 al 4 con 6.5 m. Todos los escaneos se realizaron a su máxima resolución (1/1) y una calidad de 4x.

En la Figura 4-3 se muestra los 8 escaneos realizados en toda la zona de estudio, la ubicación de cada uno fue estudiada días anteriores al levantamiento y replanteada posteriormente debido al cambio de las condiciones iniciales debido a la vegetación y problemas no previstos con anterioridad como la ubicación de las esferas. Debido al tiempo que se tarda en estacionar el equipo, ubicar estratégicamente las esferas y el tiempo de escaneo neto, el primer día se procedió a realizar 4 escaneos con un trabajo en campo aproximado de 7 horas dejando las referencias para continuar el levantamiento al día siguiente.

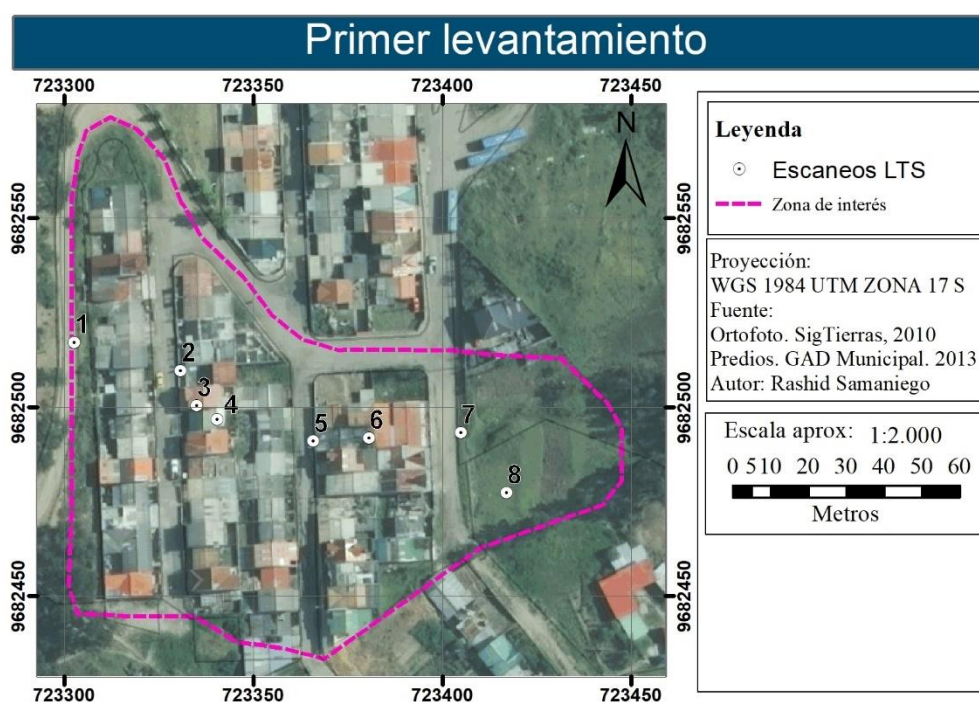


Figura 4-3 Ubicación de los escaneos con LTS realizados en el primer levantamiento (diciembre de 2016).

#### 4.1.1.2. Segundo levantamiento.

El día 1 de junio del año 2017 se realizó el segundo levantamiento con un total de 16 escaneos, ubicados entre sí a una distancia media de 13.3 m y desviación



de 8.6 m, la distancia máxima fue desde el escaneo 13 al 14 con 22.3 m y la mínima del escaneo 5 al 6 con 2.7 m. Todos los escaneos se realizaron a una resolución de 1/4 y una calidad de 4x a excepción del escaneo #16 que se realizó a una resolución 1/2 y calidad 3x.

En la Figura 4-4 se pueden observar los 16 escaneos, de la misma forma como en el primer levantamiento se generó un análisis previo al levantamiento, debido a la reducción de la resolución se generó una redistribución de los escaneos, en consecuencia la separación entre ellos disminuyó y se aumentó al doble.

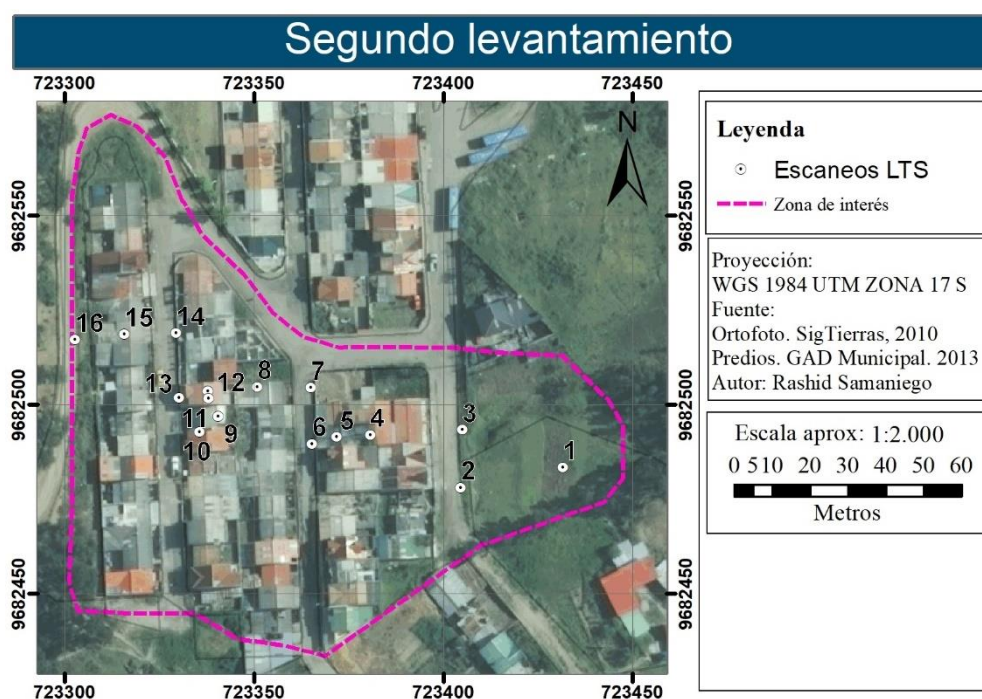


Figura 4-4 Ubicación de los escaneos con LTS realizados en el segundo levantamiento (Junio de 2017).

#### 4.1.1.3. Tercer levantamiento.

El ultimo levantamiento que se hizo para el presente estudio fue el día 7 de julio del 2017, se realizaron un total de 15 escaneos, ubicados entre sí a una distancia media de 13.2 metros y desviación de 4.8, la distancia máxima fue desde el escaneo 13 al 14 con 18.8 metros y la mínima del escaneo 5 al 6 con 3.8. Todos los escaneos se realizaron a una resolución de 1/4 y una calidad de 4x a excepción del escaneo #15 que se realizó a una resolución 1/2 y calidad 3x. En la Figura 4-5 se muestra la distribución de los 15 escaneos realizados.

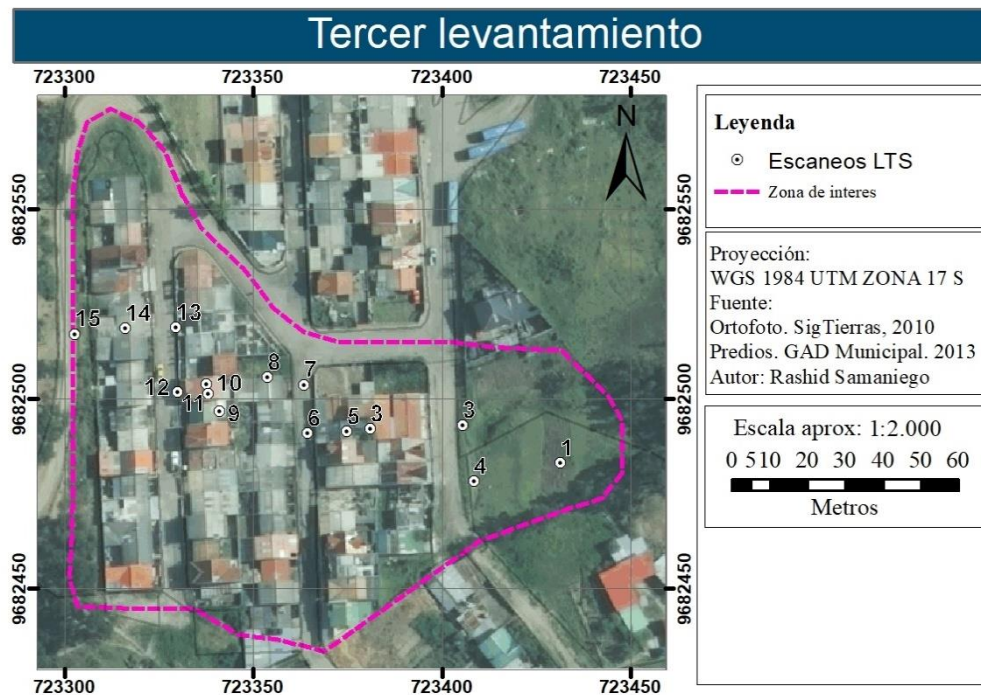


Figura 4-5 Ubicación de los escaneos con LTS realizados en el tercer levantamiento (Julio de 2017).

En la visita de campo anterior al levantamiento se observó un crecimiento abundante de la vegetación debido a una época de altas precipitaciones en la zona de estudio, la vegetación interfiere en los escaneos creando sombra a los objetos que se encuentran detrás, para evitar esto el día anterior se procedió a podar la maleza de los lugares más importantes, lo que nos ayudó a optimizar el tiempo al determinar el lugar de los objetos de referencia más óptimo y teniendo menor interferencia al escanear (Figura 4-6).



Figura 4-6 Desbrozado de la vegetación.






#### **4.1.2. Registro o unión de escaneos**

El escáner laser cuenta con el programa SCENE, que nos permite unir fácilmente los escaneos de manera interactiva, el programa registra los escaneos de dos en dos usando como mínimo tres de los objetivos antes mencionados (esferas, cartulinas...); existen también otros programas como ReCap 360 de Autodesk el cual trabaja con otros algoritmos y utilizando los recursos de hardware de manera diferente a la de Scene, ambos procesan los datos de forma confiable, este proceso tiene como objetivo lograr que cada escaneo individual que se realizó en los tres levantamientos se ubiquen en los lugares que les corresponde en relación el uno con el otro, todo esto con una precisión milimétrica, los objetos en común escaneados como viviendas, carreteras, entre otros quedan perfectamente enlazados. El primer levantamiento en primera instancia se intentó unir con el programa Scene pero al empezar a cargar se comprobó que recursos de hardware disponibles no eran suficientes para su proceso ya que sólo dos escaneos utilizaban 14Gb de los 16Gb de la memoria RAM (ver cap 3.10); estos escaneos se unieron con el programa ReCap 360 de Autodesk, el cual no utilizaba mucha memoria RAM pero si tardaba varias horas en cada proceso, durando un total de 5 días completos para unir los 8 escaneos realizados. El segundo y tercer escaneo se procesó con el software Scene propio del equipo.

##### **4.1.2.1. Registro con Scene 5.5.0.44203**

El primer paso para empezar con el proceso en programa es descargar los datos de los diferentes escaneos realizados, en la memoria SD del TLS se encuentran los archivos con extensión “.fls”. A continuación, se describe paso a paso el proceso que se siguió para el registro de los levantamientos mediante este programa.

- a) Se crea un nuevo proyecto.
- b) Se arrastran los archivos a la pantalla del programa.
- c) Señalamos los archivos y elegimos la opción “cargado”, la cual empieza a leer los datos y cargarlos a la memoria RAM.

- d) En este paso podemos aplicar el color a las imágenes o también podemos saltarnos y hacerlo después de registrar los escaneos, esto depende de la visibilidad de los objetivos, ya que en ocasiones se ven mejor las esferas es preferible trabajar en escala de grises y en otras en donde muestran los colores reales. Todo esto se puede realizar con la opción “operación - color/imágenes” aquí podemos elegir si deseamos colorear el escaneo o también volver a su estado inicial de escala de grises.
- e) La opción “vista 3D” con el icono  nos permite visualizar el modelo tridimensional de los escaneos individuales, aquí podemos realizar la primera limpieza del ruido con la opción “selector de polígonos” con el símbolo , esto nos permite eliminar puntos de ruido, que no sean de interés o estén fuera de la zona de estudio.
- f) Para el registro elegimos la opción “crear vista de correspondencia” que tiene el siguiente icono . Se visualiza una pantalla dividida en dos partes, sin importar el orden se podrá arrastrar dos escaneos consecutivos previamente cargados a colores o escala de grises
- g) Luego de seguir correctamente los pasos anteriores automáticamente aparece una barra llamada “vista de correspondencia dividida”, en esta barra podemos marcar lo siguiente: objetivo circular plano, objetivo tablero cuadriculado esfera, plano, losa y punto, también la opción de correspondencias que son: buscar correspondencias, eliminar correspondencias y forzar correspondencias actuales, todo esto entre los escaneos mostrados, y por último forzar una correspondencia y abrir vista de correspondencia. En este estudio se realizaron los registros mediante esferas, objeto de tablero cuadriculado y en algunos casos para mejorar la precisión con planos.
- h) Se repite el paso anterior las veces que sean necesario hasta poder registrar los escaneos con el mínimo error, no existe un número máximo de objetivos para registrar y se puede registrar con más de un escaneo adyacente que tengan visibles los registros de correspondencia.





- i) Para finalizar la operación de registro seleccionamos “operaciones-registro-colocar escaneos” o el atajo “control + R”.
- j) El modo de colocación que se utiliza es “basado en objetivos”.
- k) Colocamos las imágenes en caso de estar a escalas de grises (revisar inciso d).
- l) Podemos repetir nuevamente el paso de eliminación de puntos que no sean de interés.
- m) Procedemos a crear la opción “Nube de puntos”, que es una herramienta muy útil para visualizar de mejor manera y también reducirá el tiempo de cargado significativamente al abrir nuevamente el proyecto; lo que se debe tomar en cuenta es que no se podrá realizar más modificaciones en el proyecto mediante el programa Scene.
- n) Procedemos a exportar la nube de puntos de escaneo con el formato en el que se necesite, en este estudio se prefirió trabajar con “.e57”. Para mejor facilidad en el manejo posterior de la nube de puntos se exportaron los escaneos en un archivo separado, pero se conserva su ubicación.

#### **4.1.2.2. Registro con ReCap 360**

De la misma forma que el programa Scene nos ayuda a registrar los escaneos individuales obteniendo resultados favorables, la diferencia entre estos dos programas es que Recap 360 nos permitió trabajar con escaneos de resoluciones altas con un computador de gama media, este software es más intuitivo y sencillo de usar a comparación de Scene, pero el momento de procesar la información tarda mucho más.

A continuación, se describen brevemente los pasos que se siguieron para el registro.

- a) Creamos un nuevo proyecto
- b) Importamos los archivos, en este caso con extensión “.fls”



- c) Seleccionamos la opción registro, nos aparecerá dos escaneos en una pantalla dividida, podremos cambiar los escaneos mostrados en el caso de no tener objetos en común.
- d) Seleccionamos esferas o puntos en común, no es necesario ser exactos con los objetos de referencia ya que ReCap trabaja con la estructura de la nube de puntos en común.
- e) Si estamos de acuerdo con el registro realizado presionamos “refine scan” y continuamos con los escaneos siguientes.
- f) Una vez realizado todos los registros de los escaneos nos saldrá la opción de aprobar el proceso.
- g) Para finalizar colocamos “registrar escaneos” y empezara el proceso de registro y se grabara en el disco.
- h) Exportamos los archivos en formato deseado, en esta tesis se utilizó “.e57”.

#### **4.1.3. Edición de levantamientos.**

Para obtener un modelo tridimensional de nube de puntos optimo se pasó por varios procesos de edición con el programa CloudCompare. A continuación, se explica detenidamente los procesos que se siguieron para obtener una nube de puntos óptima para su análisis.

##### **4.1.3.1. Disminución de la densidad de puntos**

Para un correcto escaneo es necesario hacerlo en la máxima resolución y calidad del equipo (ver cap 4.1.1) ya que así se disminuye el ruido y mejora el escaneo de objetos lejanos, pero los objetos cercanos tienen mayor densidad de puntos y también el momento de registrar los escaneos se generan un traslape entre los escaneos manteniendo a un objeto con los puntos de cada escaneo, al momento de procesar los datos existe demasiada información por lo que es necesario disminuir la densidad de puntos. El software CloudCompare tiene una herramienta llamada “Subsample a pointcloud” que es un algoritmo el cual deja espacios entre puntos cercanos en un radio especificado por el usuario, lo que nos permite disminuir la cantidad de puntos en los objetos demasiado densos y mantener la cantidad de puntos en los objetos menos densos que por lo general

son los más lejanos al escáner. Para el caso de todos los escaneos se procedió a reducir a un radio de 0.01 m en cada escaneo. Este valor se lo designó luego de varias interacciones ya que entre 0.001 m y 0.009 m no se podía cargar los tres levantamientos a la vez en la máquina usada para el análisis (ver cap 3.10). Así se pudo reducir los puntos de una manera significativa (ver Tabla 4-2).

	Levantamiento 1	levantamiento 2	levantamiento 3
Puntos densidad original	745'382 066	336'241 770	310'685 773
Puntos densidad a 0,01m	92'979 308	59'549 960	51'648 103
Puntos reducidos	652'402 758	276'691 810	259'037 670

*Tabla 4-2 Número puntos antes y después del proceso de reducción.*

#### **4.1.3.2. Eliminación de ruido**

El ruido en los escaneos es inevitable, por tanto, es necesario dedicar un tiempo para disminuirlo manualmente con la herramienta “segment”, la cual nos permite cortar el escaneo o dividir en varias partes aislando cada vez el ruido de los objetos escaneados para el análisis. Este proceso se realizó en cada escaneo por separado, para ello se exportó el escaneo individualmente luego de registrarlo (ver cap 4.1.2). En la Figura 4-7 se muestra el proceso del escaneo 6 del levantamiento 3 (ver cap 4.1.1.3) para la eliminación del ruido. En primer lugar, se muestra el modelo tridimensional del escaneo en donde se observan puntos suspendidos que no tiene relación con el paisaje, en la segunda figura se nota la diferencia con la primera ya que los puntos suspendidos han sido eliminados mejorando su visualización, y en la última se visualiza únicamente el ruido que ha sido eliminado de la segunda figura.





*Estado original del modelo del levantamiento con ruido.*



*Estado final del modelo luego de la eliminación del ruido.*



*Ruido eliminado del modelo.*

*Figura 4-7 Ejemplo de eliminación de ruido en modelo tridimensional de puntos, vista en perspectiva.*



#### **4.1.3.3. Edición de puntos fuera de la zona de interés.**

El escáner Faro tiene un alcance de 130 m (ver cap 3.3), en los 3 levantamientos realizados fue inevitable capturar puntos de objetos que están fuera de la zona de interés, es necesario eliminar esos puntos para disminuir el exceso de datos que ralentizan el proceso. En la Figura 4-8 se presenta el levantamiento 3 en el proceso de eliminación de datos que no se consideraron de interés, en primer lugar se muestra el levantamiento una vez ya registrado ver (4.1.2) y disminuido la densidad (ver cap 4.1.3.1). Cabe recalcar que ya en el momento de registrar en los programas Scene y ReCap ya se eliminaron algunos puntos sin interés, en la segunda imagen se muestra la nube de puntos más nítida, sin muchos obstáculos que opacan la zona de interés y en la tercera y última imagen se observa los datos extraídos de la nube de puntos inicial.



*Estado inicial de la nube de puntos luego del registro*



*Nube de puntos de la zona de interés.*



*Nube de puntos eliminada.*

*Figura 4-8 Ejemplo de eliminación de datos fuera de la zona de estudio, vista en perspectiva.*

#### 4.1.4. Alineación de levantamientos

Para realizar la comparación entre levantamientos de distintas fechas es necesario colocar los escaneos en la posición real en relación del uno con el otro, para ello usaremos el software CloudCompare, el cual nos permite colocar coordenadas a puntos conocidos en el escaneo, para ello se usan las coordenadas de los hitos estáticos (Figura 4-9) situados fuera del deslizamiento, en la zona más alta y estable (ver cap 4.1.1). Sus coordenadas no necesitan estar georreferenciadas ya que simplemente tienen el mismo sistema de referencia local puesto en los hitos principales con coordenadas (1000,1000,2500) y (1040.039,1016.837, 2500.299), colocados en la zona más alta y estable fuera del deslizamiento, de la misma forma también se pueden usar puntos que estén fueran del deslizamiento y que sean captados en el levantamiento por la potencia del láser que llega a distancias de 130m, estos puntos fueron esquinas de elementos estructurales de las casas.

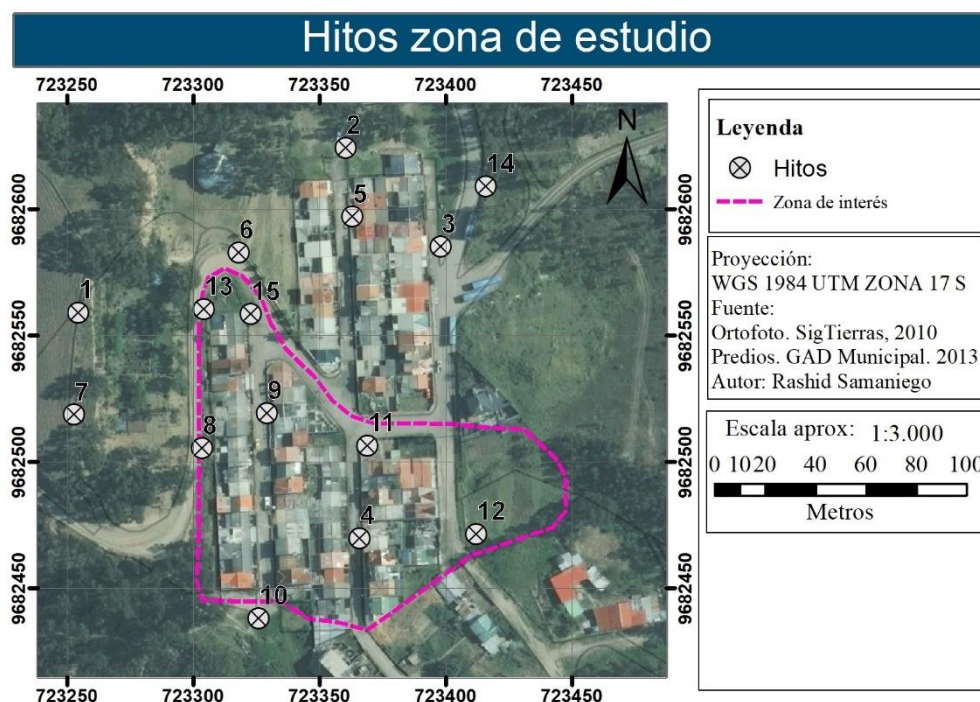


Figura 4-9 Distribución hitos de monitoreo en de la zona de estudio.

#### 4.1.5. Extracción de secciones de nubes a lo largo de perfiles a analizar

Se crearon 4 perfiles al largo de la zona escaneada (Figura 4-10) de los tres levantamientos en donde se extrajeron las nubes de puntos de los elementos



estructurales y constructivos como losas, cubierta, vigas, columnas y losas, para realizar la extracción de nube de puntos se utilizó la herramienta “Extract cloud sections along polyline or unfold a cloud along polyline” en el programa CloudCompare.



*Figura 4-10 Perfiles para la extracción de nubes.*

#### **4.1.6. Representación gráfica para el análisis de los perfiles.**

Cada sección de nube extraída del modelo tridimensional de puntos se exportó en formato “.LAS” al programa AutoCAD Civil 3D con la herramienta “Ponit Clouds” para poder representar el perfil mediante una escala gráfica en metros con su alineamiento respectivo .

#### **4.1.7. Creación de modelo BIM a partir de nube de puntos.**

Al escanear la zona de estudio se capturó algunas edificaciones de interés, se aislaron eliminando los puntos que no formaban parte de sus elementos estructurales y constructivos. Para la reconstrucción del modelo BIM se usó el programa ArchiCAD muy útil por su herramienta de importación de nubes de puntos que facilita el dimensionamiento de la vivienda, con el se puede construir sobre el modelo tridimensional de puntos y acompañado con el programa CloudCompare que nos permite medir las distancia entre puntos con la herramienta “point picking”. Se reconstruyeron dos viviendas que visiblemente tenían grandes daños en su estructura y una nube de puntos óptima para su análisis.

#### **4.1.7.1. Construcción edificaciones**

En la edificación 1 se realizaron 2 escaneos internos y 4 externos alrededor de la misma, al momento de reconstruir el segundo piso no se pudo distribuir las habitaciones con las dimensiones exactas, ya que, no existían puntos que revelen información importante; se determinó una distribución en base a fotografías tomadas conjuntamente con los elementos constructivos del primer piso y la escalera. Los planos de la edificación se encuentran en el *Anexo 8*. En la edificación 2 se pudo evidenciar que consta de una construcción de 3 casas independientes de 1 solo piso con medidas similares y distribución de espacios iguales, los planos se encuentran en el *Anexo 9*. En esta edificación se realizaron un total de 4 escaneos externos alrededor de la misma, uno de ellos se generó en una zona alta, lo que permitió obtener información más detallada de su interior. No se pudieron realizar escaneos internos puesto que existía vegetación dentro de ella. En la Figura 4-11 y 4-12 se muestra las edificaciones 1 y 2 respectivamente. En primer lugar, observamos la fotografía tomada en campo en la fecha 2017-06-01 donde se puede apreciar el estado actual en el que se encuentra, la siguiente imagen presenta la edificación en nube de puntos luego de procesar y eliminar los puntos alrededor de ella que no formaban parte de sus elementos estructurales ni constructivos, en tercer lugar y último observamos el modelo BIM renderizado.





Estado en la fecha 2017-06-01.



Modelo tridimensional de puntos. 2017-07-08.



Modelo BIM generado en ArchiCAD.

*Figura 4-11 Fotografía, nube de puntos y modelo BIM – Edificación 1.*



Estado en la fecha 2017-06-01.



Modelo tridimensional de puntos. 2017-07-08.



Modelo BIM generado en ArchiCAD.

*Figura 4-12 Fotografía, nube de puntos y modelo BIM – Edificación 2.*



## 4.2. Caracterización física y mecánica de los suelos.

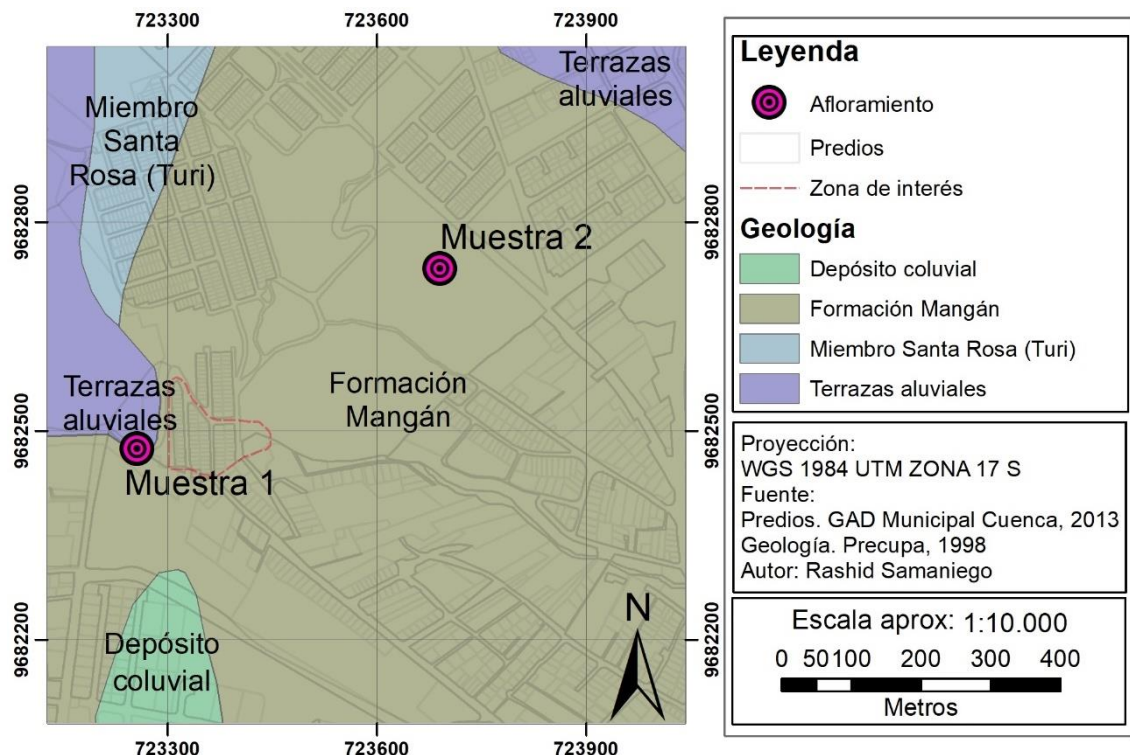


Figura 4-13 Mapa de sitio del lugar de extracción de muestras.

Sitio	Afloramiento	Bloque Extraído
 Escarpe de la terraza aluvial Qt 1-5		
Preparacion de muestras para corte directo		Muestras después del corte directo
 Muestra semi-remoldeada	 Muestra preparada	

Figura 4-14 Cuadro resumen muestra 1: sitio, afloramiento, preparación de las muestras y muestras después de los ensayos.

Sitio	Afloramiento	Bloque extraído	Preparación de muestras para corte directo
 <p>Talud Artificial Calle X Juegos Olimpicos</p>			 <p>Mateial pasado por el tamiz #4</p>
Muestras después del corte directo	Muestras índice liquido	Muestras índice plástico	Granulometría
			

Figura 4-15 Cuadro resumen muestra 2: sitio, afloramiento, preparación de las muestras y muestras después de los ensayos.



#### **4.2.1. Granulometría por cribado**

Este ensayo se realiza mediante la norma ASTM D422 y el procedimiento es el siguiente:

- 1) Se toma una muestra del suelo por cuarteo y se seca en el horno a una temperatura de 105° por 24 horas.
- 2) Se pesa alrededor de 2000 gr de suelo seco.
- 3) Pasar el suelo por el tamiz 200, lavándolo con agua, las veces que sean necesarias hasta que esta quede aparentemente limpia.
- 4) Llevar al horno el material que retiene el tamiz 200, a una temperatura de 300°C durante 24 horas.
- 5) Una vez seca la muestra se realiza el análisis granulométrico, utilizando los tamices #10, #40, #100, #200 y el fondo.
- 6) El juego de tamices lo colocamos de manera progresiva sobre el agitador mecánico.
- 7) Terminado el periodo de vibración, se procede a pesar el material retenido en cada tamiz.

#### **4.2.2. Límite de consistencia o límites de Atterberg**

Estos ensayos sirven para clasificar el suelo mediante el método de clasificación unificada SUCS. Los límites de consistencia deben determinarse con la fracción del suelo que pasa la malla 40. Si el espécimen es arcilloso, es preciso que nunca haya sido secado a humedades menores que su límite plástico, aproximadamente.

##### **4.2.2.1. Límite Líquido, LL.**

Este ensayo se basa en determinar el contenido de agua del suelo mediante la copa de Casagrande, según la Norma ASTM D-4318.

- 1) Tómese unos 100 g de suelo húmedo y mézclese con una espátula, añadiendo agua, hasta que adopte una consistencia suave y uniforme.



- 2) Colóquese una porción de esa pasta en la copa de Casagrande, con un espesor máximo de 1 cm y hágase, con el ranurador apropiado, la ranura correspondiente; el ranurador deberá mantenerse en todo el recorrido normal a la superficie interior de la copa.
- 3) Acciónese la copa a razón de dos golpes por segundo, contando el número de golpes necesario para que la parte inferior del talud de la ranura se cierre 1,27 cm. La ranura deberá cerrarse por flujo del suelo y no por deslizamiento del mismo respecto a la copa.
- 4) Re-mézclese el suelo en la copa, con la espátula, repitiendo las etapas (2) y (3) dos veces más, si el número de golpes necesario para el cierre de la ranura es consistentemente el mismo en las 3 ocasiones. Si alguno de esos números resulta muy diferente de los otros, repítanse una cuarta vez las etapas (2) y (3). Así se tiene un número de golpes correspondiente a un cierto contenido de agua del suelo. Entre dos determinaciones, el número de golpes no debe diferir en más de un golpe.
- 5) Cuando se ha obtenido un valor consistentemente del número de golpes, comprendido entre 6 y 35 golpes, tómese 10 g de suelo, aproximadamente de la zona próxima a la ranura cerrada y determínese su contenido de agua de inmediato.
- 6) Repítase las etapas (2) a (5) teniendo el suelo otros contenidos de agua. Para humedecer el suelo, úsese un gotero, re moldeando la pasta hasta que el agua añadida quede uniformemente incorporada. Para secar el suelo, úsese la espátula, re mezclándolo, de modo que se produzca evaporación; en ningún caso se secará la muestra en un horno o sometiéndola a ningún proceso de evaporación violenta. De esta manera deberán tenerse, como mínimo, 4 valores del número de golpes correspondientes a cuatro diferentes contenidos de agua, comprendidos entre 6 y los 35 golpes. Cada valor será obtenido como se dijo en la etapa (4) de, por lo menos, tres determinaciones sucesivas.
- 7) Dibújese la gráfica (curva de fluidez) con los contenidos de agua y los números de golpes correspondientes, los primeros como ordenadas en





escala natural y los segundos como abscisas, en escala logarítmica. Esta curva debe considerarse como una recta entre los 6 y los 35 golpes. La ordenada correspondiente a los 25 golpes será el límite líquido del suelo.

#### **4.2.2.2. Límite Plástico, LP.**

El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. Este ensayo se realiza según la Norma ASTM D4318.

- 1) Mézclese perfectamente alrededor de 15 g de suelo húmedo.
- 2) Rólese el suelo sobre una placa de vidrio o metal con la mano, hasta alcanzar un diámetro de 3 mm, aproximadamente.
- 3) Repítase la etapa (2) hasta que el cilindro presente señales de desmoronamiento y agrietamiento al alcanzar el diámetro de 3 mm aproximadamente.
- 4) Al llegar al límite señalado (3), determínese el contenido de agua de una parte del cilindro correspondiente

Repítase las etapas (2) a (4) dos veces más para obtener 3 valores. El límite plástico se determina colocando los trozos de cilindros en un recipiente, para secar en el horno a 105 °C, durante 24 horas, y determinando la humedad de los mismos.

El Índice de plasticidad (IP): Se obtiene a partir de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo:  $IP = LL - PL$ .

#### **4.2.3. Ensayo corte directo**

Para conocer los parámetros de resistencia a cortante lento, se utilizó la máquina digital de corte directo del Laboratorio de Suelos de la Universidad de Cuenca tomando en cuenta la norma ASTM D-3080.

#### **Preparación de la muestra**

Si la prueba ha de hacerse sobre arcillas alteradas procedentes, por ejemplo, de una prueba de compactación, el material del molde en el que ésta se haya efectuado se tratará como de una muestra inalterada.



- 1) Introduzca el molde muestreador, sobre la muestra compactada, u enrácese es común que los aparatos de corte directo usen especímenes cuadrados de 6 cm de lado.
- 2) Antes de proceder a la realización de la prueba se pesará la muestra, para determinar los pesos específicos y humedad del material probado.

### **Preparación de la muestra**

Si la prueba ha de hacerse sobre arcillas alteradas procedentes, por ejemplo, de una prueba de compactación, el material del molde en el que ésta se haya efectuado se tratará como de una muestra inalterada.

- 1) Introduzca el molde muestreador, sobre la muestra compactada, u enrácese es común que los aparatos de corte directo usen especímenes cuadrados de 6cm de lado ver.
- 2) Antes de proceder a la realización de la prueba se pesará la muestra, para determinar los pesos específicos y humedad del material probado.

### **Procedimiento de la Prueba**

- 1) Mídanse las dimensiones de la caja del aparato en que se alojará el suelo.
- 2) Obténgase la carga muerta propia del aparato, que será el peso del mecanismo de carga, cuando aplique carga normal nula. En ocasiones esta carga muerta se balancea con un mecanismo apropiado.
- 3) 3. Colóquese la muestra en la caja del aparato. Ésta debe tener un espesor del orden de 1 a 2 cm. Espesores mayores acentúan el fenómeno de falla progresiva y hacen que se obtengan resistencias menores. La superficie de la muestra deberá nivelarse cuidadosamente con un aditamento apropiado.
- 4) Se procede a saturar la muestra llenando el depósito de agua.
- 5) Colóquese una placa sobre el espécimen y, sobre ella, sitúese el mecanismo transmisor de presión normal.
- 6) Aplíquese la carga normal deseada.



- 7) Colóquense los extensómetros para medir las deformaciones normal y tangencial, anotando sus lecturas iniciales.
- 8) Verifíquese que no haya contacto entre los marcos fijo y móvil de la caja que contiene el suelo.
- 9) Iníciase el proceso de la aplicación de la carga tangencial a una velocidad de corte de 0.001 mm/min, haciendo lecturas de la carga aplicada y de las deformaciones normal y tangencial, a diversos tiempos. (prueba con deformación controlada).
- 10) El ensayo de corte directo consolidado drenado (lento) se basa en mantener una tasa de deformación baja, con el fin de que se disipe la presión de poro y se realice el corte con esfuerzos efectivos.

Para una prueba dada, el esfuerzo normal se calcula como:

$$\sigma = \sigma' = \text{esfuerzo normal} = \frac{\text{Fuerza normal}}{\text{área de la sección transversal del espécimen}}$$

El esfuerzo cortante resistente para cualquier desplazamiento cortante se calcula como:

$$\tau = \text{esfuerzo tangencial} = \frac{\text{Fuerza cortante resistente}}{\text{área de la sección transversal del espécimen}}$$

11. En la prueba de corte directo lento con deformación controlada, se considera como esfuerzo cortante de falla, el correspondiente a una deformación tangencial unitaria del 3.5%.

#### 4.2.4. Ensayos MASW, ESAC Y REMI

**MASW:** Formando una línea recta se procedió a instalar 24 geófonos a 1.5 metros de separación a lo largo de las vías donde se realizó el ensayo, después se realizaron 5 impactos con un martillo en una placa de acero a lo largo de la línea de geófonos, estos impactos son conocidos como “shots”, en total fueron 7.

**ReMi:** se utilizó el mismo arreglo lineal que se utilizó en el ensayo del MASW, con ello se registran largos períodos de tiempo las vibraciones ambientales para el registro de datos correspondientes.

**ESAC:** para este ensayo se necesita modificar la configuración de ubicación de geófonos, se trazan dos líneas perpendiculares, y el número de geófonos para este ensayo se utilizan 12 en total separados 3 metros y se registran largos periodos de tiempo las vibraciones ambientales para el registro de datos correspondientes.



*Figura 4-16 Configuración y ejecución de ensayos geofísicos.*

De las tres diferentes técnicas sísmicas utilizadas y explicadas anteriormente se obtiene la velocidad de propagación de las ondas sísmicas ( $V_s$  y  $V_p$ ) a través del



terreno, con esta información es posible calcular las propiedades elásticas dinámicas del suelo para los diferentes estratos detectados: el coeficiente de Poisson dinámico, el módulo de corte dinámico, el módulo edométrico dinámico, el módulo de elasticidad dinámico y el modulo volumétrico dinámico.

### 4.3. Creación del perfil geológico de la ladera.


#### 4.3.1. Perfil topográfico

Dentro del levantamiento de nube de puntos con el TLS se realizó el proceso de eliminación de puntos para dejar sólo puntos de terreno, eliminando las edificaciones y la vegetación (Figura 4-17). La densidad de puntos se redujo a una distancia de 50 cm de punto a punto (ver cap 4.1.3.1) y se exportaron como “.txt” que luego se importa al software AutoCAD Civil 3D para la creación del perfil, para ello antes tenemos que generar superficie y alineamiento.



*Figura 4-17 Vista en perspectiva del terreno del levantamiento 3.*

##### 4.3.1.1. Creación de la superficie a partir de nube de puntos

- 1) Haga clic en la ficha Inicio grupo, crear datos de terreno menú desplegable, superficies y Crear superficie a partir de nube de puntos .




- 2) Seleccione una nube de puntos, o bien utilice una de las opciones de selección de la línea de comando para seleccionar un área de una o más nubes de puntos. Aparece en pantalla el asistente “Create TIN Surface from Point Cloud”.
- 3) En la página General, indique los detalles de la creación de superficies.
- 4) En la página “Point Cloud Selection”, ajuste la selección de las nubes de puntos y las áreas de nubes de puntos.
- 5) Haga clic en “Create Surface”.

#### 4.3.1.2. Creación del alineamiento

- 1) Desde la Ficha Inicio, *panel Crear diseño, herramienta Alineación*, accederemos a las opciones disponibles para la creación de Alineaciones. *Seleccionaremos la opción Crear alineación a partir de objetos.*
- 2) Desde la Ventana de comandos se solicita la selección de la primera línea/arco/polilínea de la alineación. *Haremos clic sobre la polilínea definida entre los puntos 1 y 2, lo más cerca posible del punto 1. Pulsaremos Intro para terminar la selección.*
- 3) Observaremos que desde la línea de comandos se nos pide confirmar la orientación de la alineación. Esta orientación tiene como finalidad la de definir el punto de inicio. En el Diálogo sólo *modificaremos el nombre de la alineación a “Eje Carretera”, aceptando los parámetros suministrados por el programa.*
- 4) *Pulsaremos Aceptar para observar que se ha generado la alineación.*

#### 4.3.1.3. Creación del perfil del terreno

- 1) Haga clic en la ficha Inicio, grupo crear diseño en el elemento desplegable Perfil y seleccionamos crear perfil de superficie .
- 2) En el cuadro de diálogo Crear perfil a partir de superficie, en la lista Alineación, seleccione la alineación horizontal que va a utilizar para el perfil.





- 3) Asegúrese de que la superficie que desea utilizar se encuentra en la lista Seleccionar superficies. Si se muestran varias superficies, presione la tecla Ctrl mientras hace clic para seleccionar una o varias de estas superficies desde las que crear perfiles.
- 4) Si lo desea, en el área Intervalo de P.K., especifique los P.K. inicial y final si desea que el perfil cubra una distancia menor que la longitud completa de la alineación horizontal.
- 5) Haga clic en Añadir para añadir el perfil de eje a la lista de perfiles.
- 6) Opcionalmente, active la casilla de verificación Desfases de muestreo. Introduzca las distancias de desfase en el campo si desea que el perfil incluya uno o más desfases desde el eje de la alineación horizontal. Utilice números positivos para especificar desfases a la derecha y negativos para desfases a la izquierda. Separe los valores mediante comas. Ejemplo: 20,-20,30,40
- 7) Si desea, haga clic en Añadir para añadir los perfiles de desfase a la lista de perfiles.
- 8) En la tabla, revise los datos para cada línea de perfil y realice las correcciones necesarias. Si lo desea, añada o suprima perfiles en la lista de perfiles.
- 9) Realice una de las siguientes acciones:
- 10) Si desea dibujar el perfil en una visualización del perfil, haga clic en Dibujar en visualización del perfil y, a continuación, vaya al procedimiento de creación de visualizaciones del perfil.
- 11) Haga clic en Aceptar. Los perfiles creados se guardan. Si la alineación cuenta con una o varias visualizaciones de perfil asociadas, los perfiles creados se añadirán a las visualizaciones.

#### 4.3.2. Estratigrafía

Para realizar la estratigrafía se usó los sondeos de la información recopilada y la obtenida mediante los ensayos sísmicos al igual que los ensayos de laboratorio realizados de muestras tomadas en la zona de estudio.



---

#### 4.4. Análisis del Factor de Seguridad (F.S.).

Para el análisis del factor de seguridad se modeló en el programa Slide 5.0 la ladera con su estratigrafía respectiva ya explicada anteriormente realizando los siguientes pasos:

- 1) Creamos un nuevo archivo.
- 2) Cargar el perfil topográfico: el perfil realizado previamente en el programa AutoCAD se guarda en formato “.dxf” y en la opción “import dxf” podemos importar el archivo que debe tener las siguientes características: ser una polylinea 2D cerrada y su capa debe tener el nombre “External”. Elegimos la única opción habilitada “External Boundary”.
- 3) Para cargar los límites de los diferentes materiales igualmente se puede cargar realizar en el programa AutoCAD e importar mediante la opción “import dxf” con las siguientes características: estar dentro de la capa llamada “material” y ser una polilínea 2D.
- 4) A cada estrato se le asigna un material, haciendo click derecho en cualquier lugar dentro de él, elegimos la opción “Assign Material”; el número máximo de materiales que se pueden introducir en el programa es de 20.
- 5) En la opción “Material Properties” se asigna a cada material sus propiedades físicas y mecánicas: peso específico, cohesión y el ángulo de fricción.
- 6) Creamos una grilla que delimita un área en donde estará ubicado el centro del círculo de falla.
- 7) En la opción “Project Setting” podemos configurar la dirección de la ladera, el sistema de medida, los métodos de análisis del factor de seguridad, la altura del nivel freático, entre otras. Para este estudio se ha realizado el análisis mediante el método de Bishop simplificado.
- 8) Una vez realizados todos estos pasos hacemos click en la opción “Compute” o con el atajo “Ctrl + T”.

## Capítulo 5

### Resultados y discusión

#### 5.1. Geometría de la zona de estudio

En la Figura 5-1 se muestra el MDT generado a partir del LÍDAR terrestre del levantamiento 3 y en la Figura 5-3 se muestra una comparación de los perfiles del terreno de la superficie de SIGTIERRAS y del levantamiento 3. La información otorgada por SIGTIERRAS es obtenida a través de fotogrametría aérea, pero a una escala superior por lo tanto precisión inferior a la que se generó mediante TLS. En la comparación grafica de los dos perfiles de terreno de diferentes fechas podemos observar que en las zonas donde no existen viviendas la superficie se asemeja, el MDT de SIGTIERRAS fue levantado antes que las casas sean demolidas y al ser obtenido mediante fotografías aéreas las viviendas generan problemas al procesar la información.

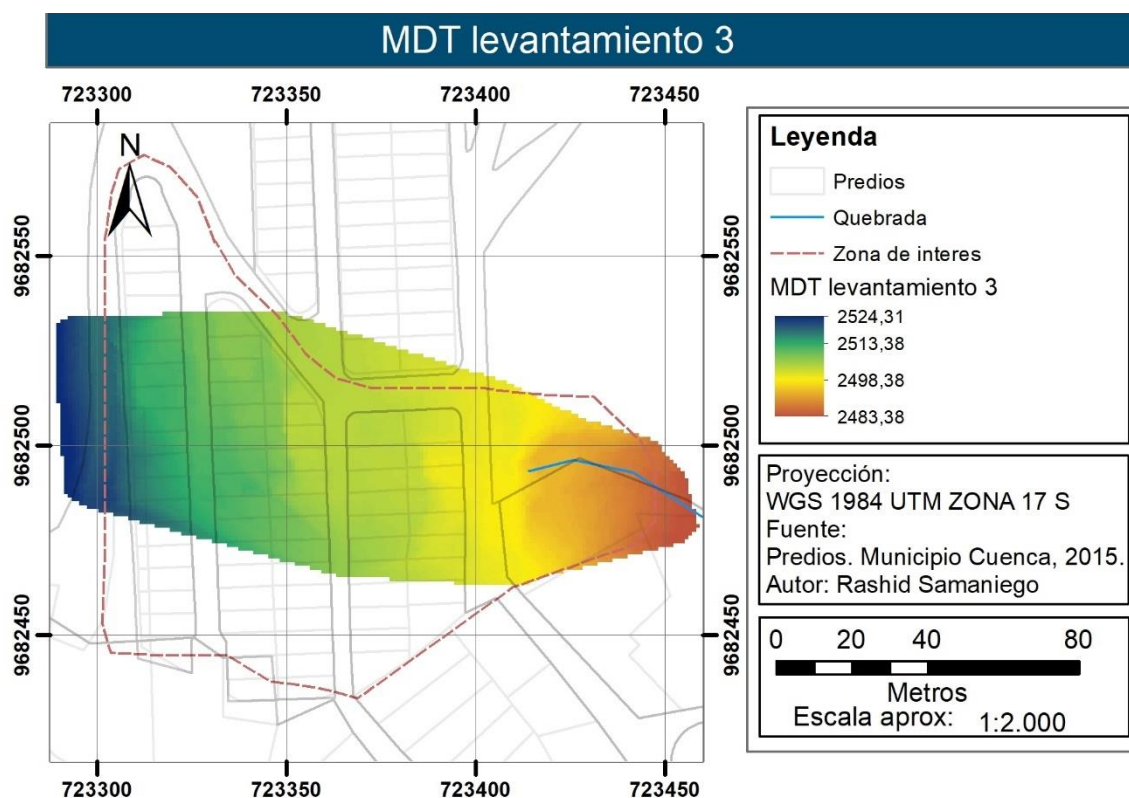


Figura 5-1 MDT generada a partir de la nube de puntos del LÍDAR terrestre del levantamiento 3 .



Figura 5-2 Alineamiento para el perfil de terreno y curvas de nivel.

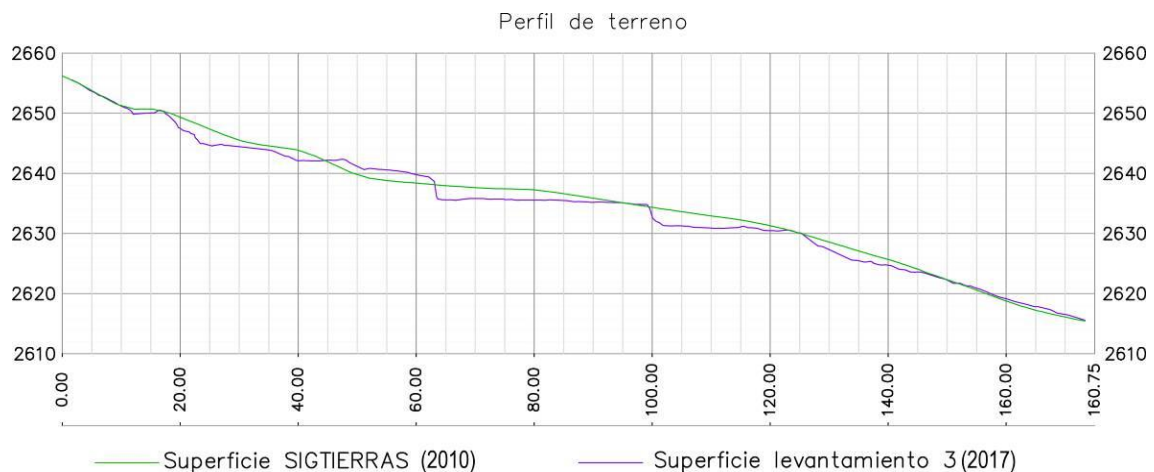


Figura 5-3 Perfil MDT SIGTIERRAS VS perfil MDT generada a partir de la nube de puntos del LÍDAR terrestre del levantamiento 3.

## 5.2. Análisis y comparación gráfica de las deformaciones de los edificios.

Para el análisis de los resultados se generaron los perfiles de nube de puntos en 4 zonas, perfil A-A', B-B', C-C' y D-D' (ver cap. 4.1.5, Figura 4-10), donde hay la mayor cantidad y la mejor calidad de puntos, capturando elementos estructurales de interés, en los cuales se pueden evidenciar claramente que han experimentado.

### 5.2.1. Perfil A-A'

La Figura 5-4 muestra el alineamiento del perfil A-A' conjuntamente con la ortofoto del levantamiento 2. En los diferentes perfiles individuales de la Figura



5-5, Figura 5-6 y Figura 5-7 se muestra una edificación que ha sufrido deformación en sus elementos estructurales, un muro de contención (abscisa 8.00 a 10.00) y dos carreteras, una en la parte superior y otra en la parte inferior del perfil. En el perfil se observa una discontinuidad aproximadamente de un metro en la estructura de una pared entre la abscisa 14.00 y 16.00. En la Figura 5-8, Figura 5-9 y Figura 5-10 observamos que toda la estructura se está deslizando ladera abajo pero desde la abscisa 15.00 la estructura presenta un mayor movimiento, en la comparación del primer y último levantamiento (Figura 5-9) que tienen la mayor separación temporal entre sí de 204 días, la pared se mueve hacia abajo en relación del eje z alrededor de 10 cm y la carretera se observan que se hunde alrededor 12.9 cm, pero la pared anterior a la abscisa 15.00 se hunde únicamente alrededor de 3.5 cm y en la carretera no se presenta un movimiento significativo.





Figura 5-4 Alineamiento del perfil A-A' – Ortofoto creada a partir de la nube de puntos del LÍDAR terrestre.



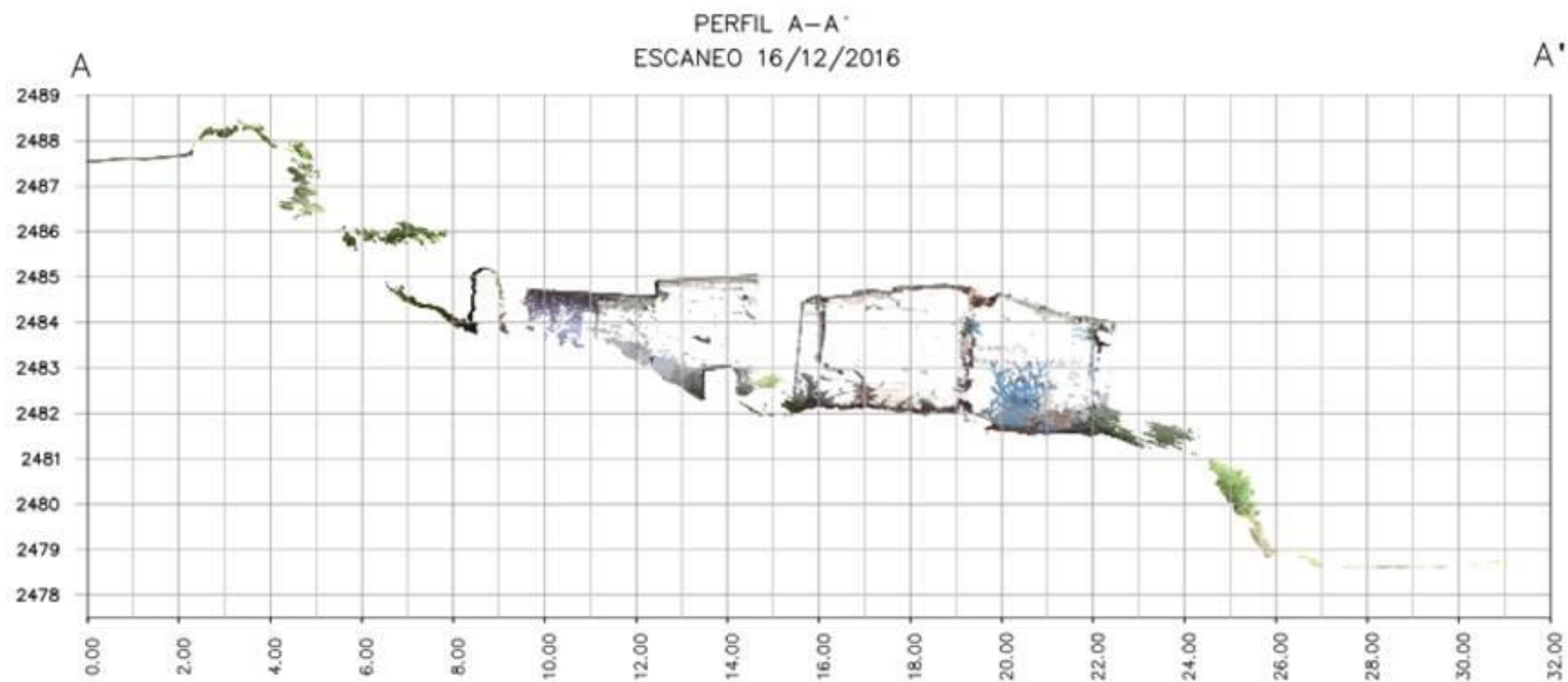


Figura 5-5 Perfil A-A' primer levantamiento

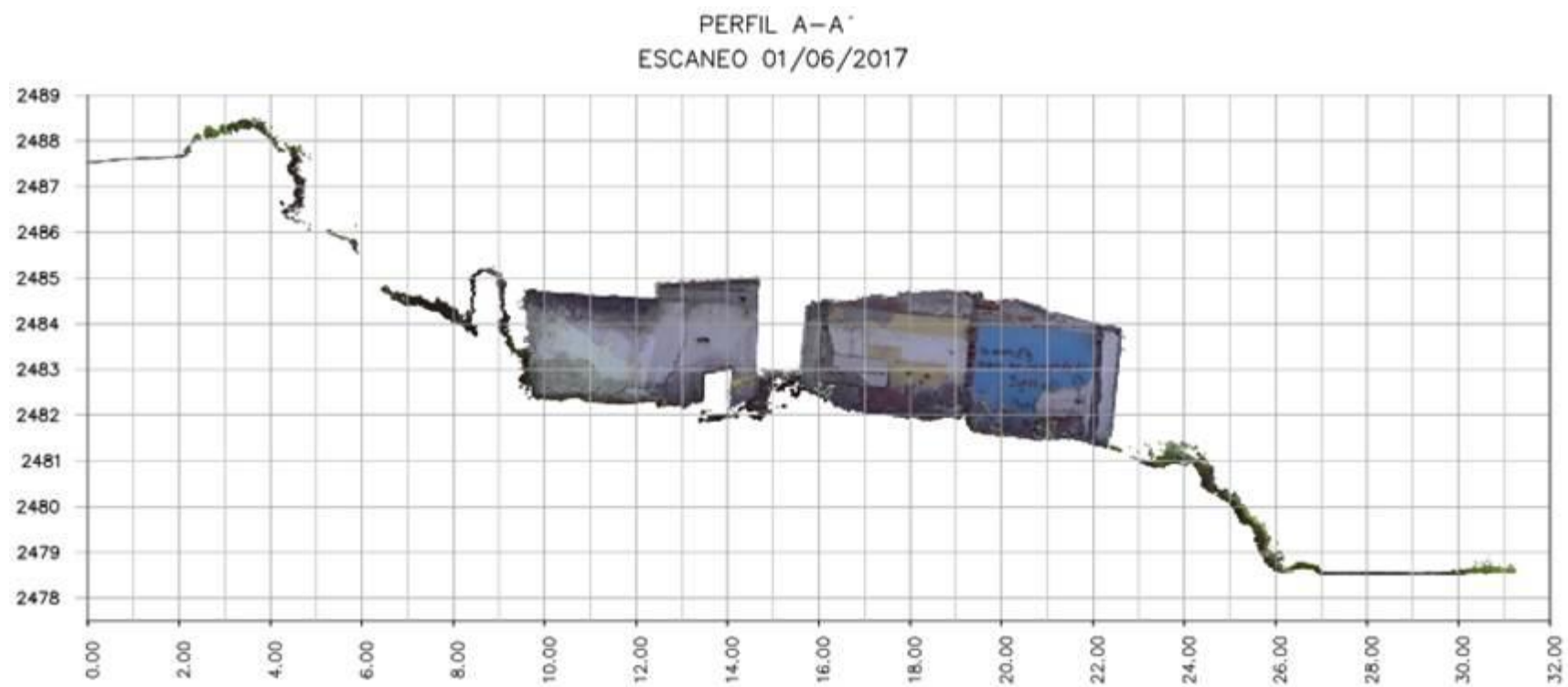


Figura 5-6 Perfil A-A' segundo levantamiento.

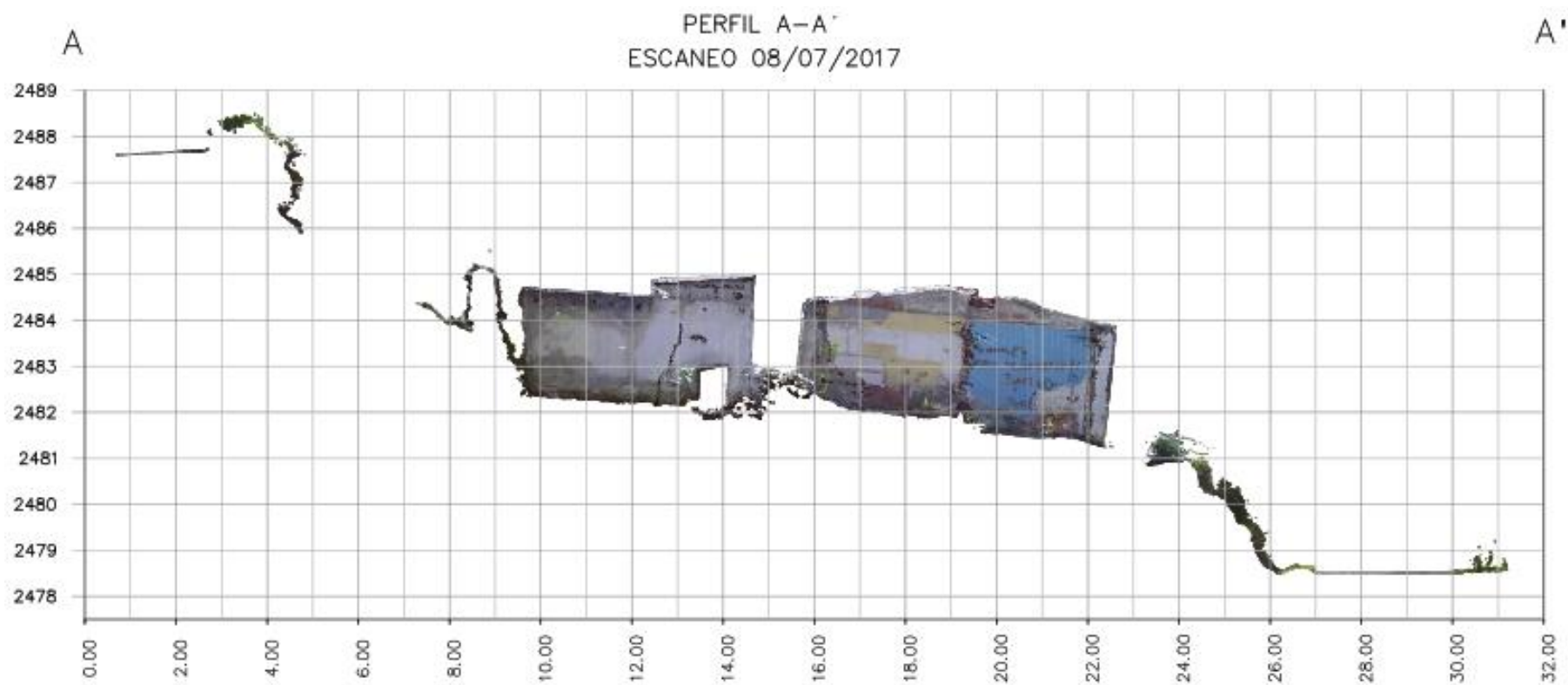


Figura 5-7 Perfil A-A' tercer levantamiento.

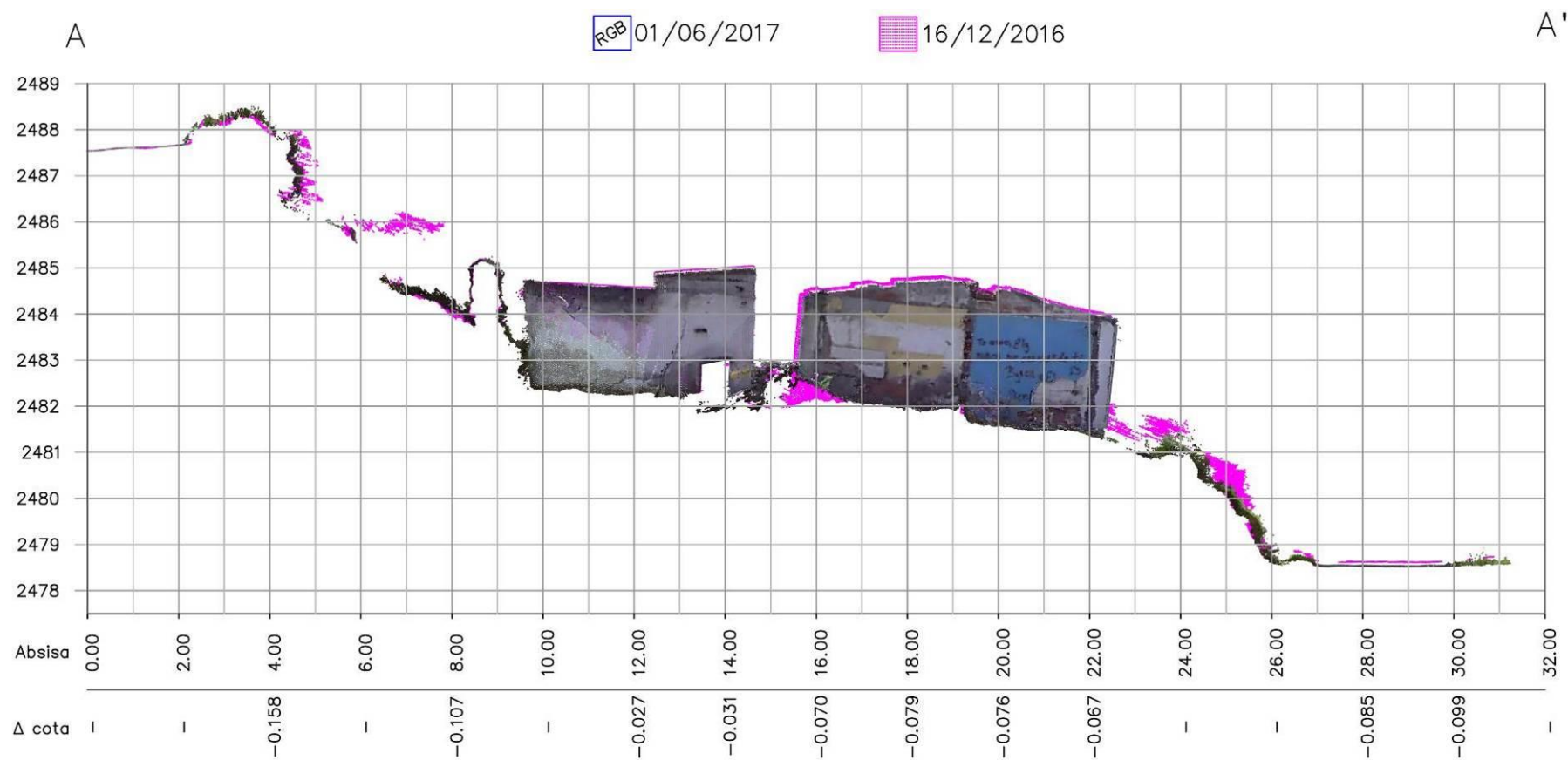


Figura 5-8 Levantamiento 1 vs levantamiento 2, perfil A-A'.

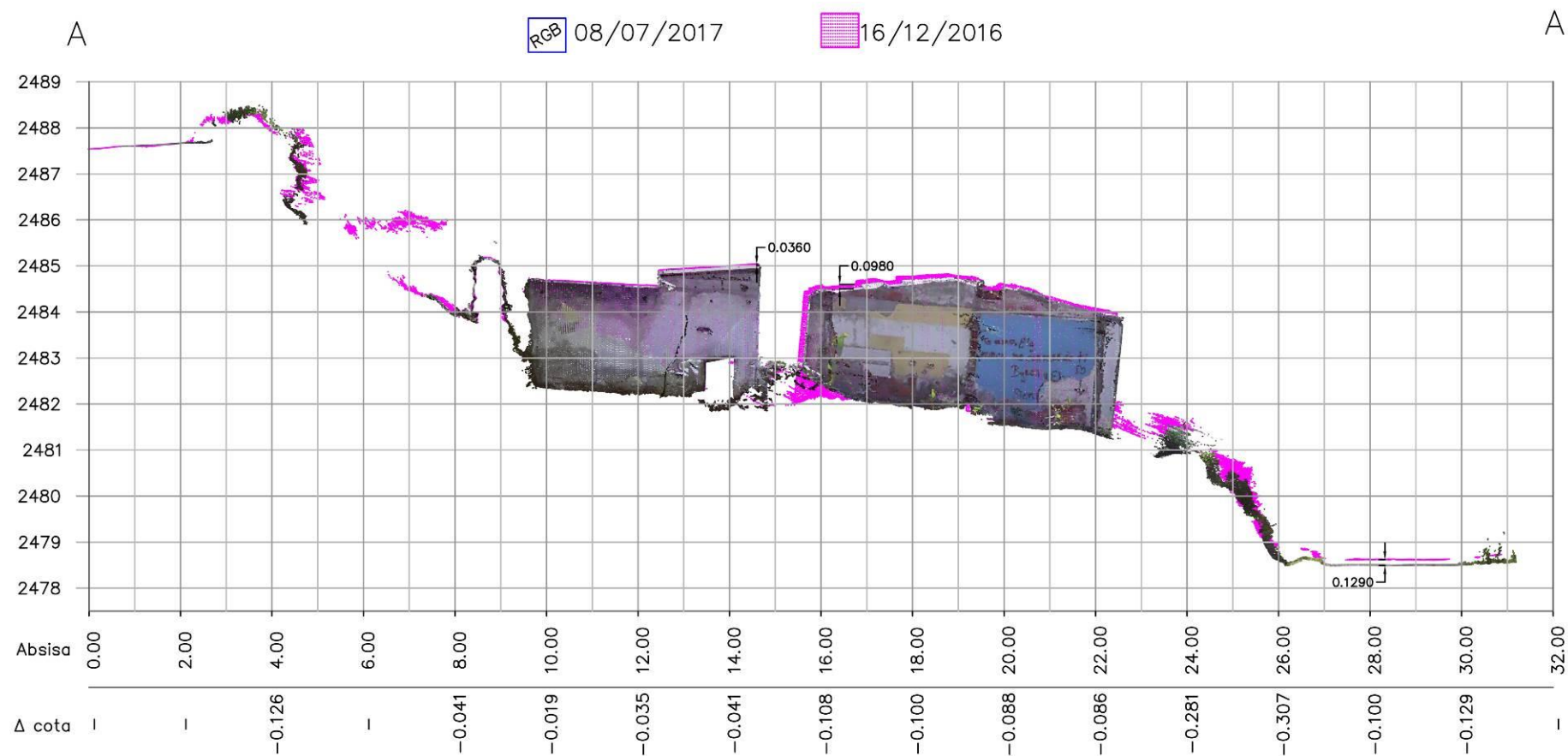


Figura 5-9 Levantamiento 1 vs levantamiento 3, perfil A-A'.

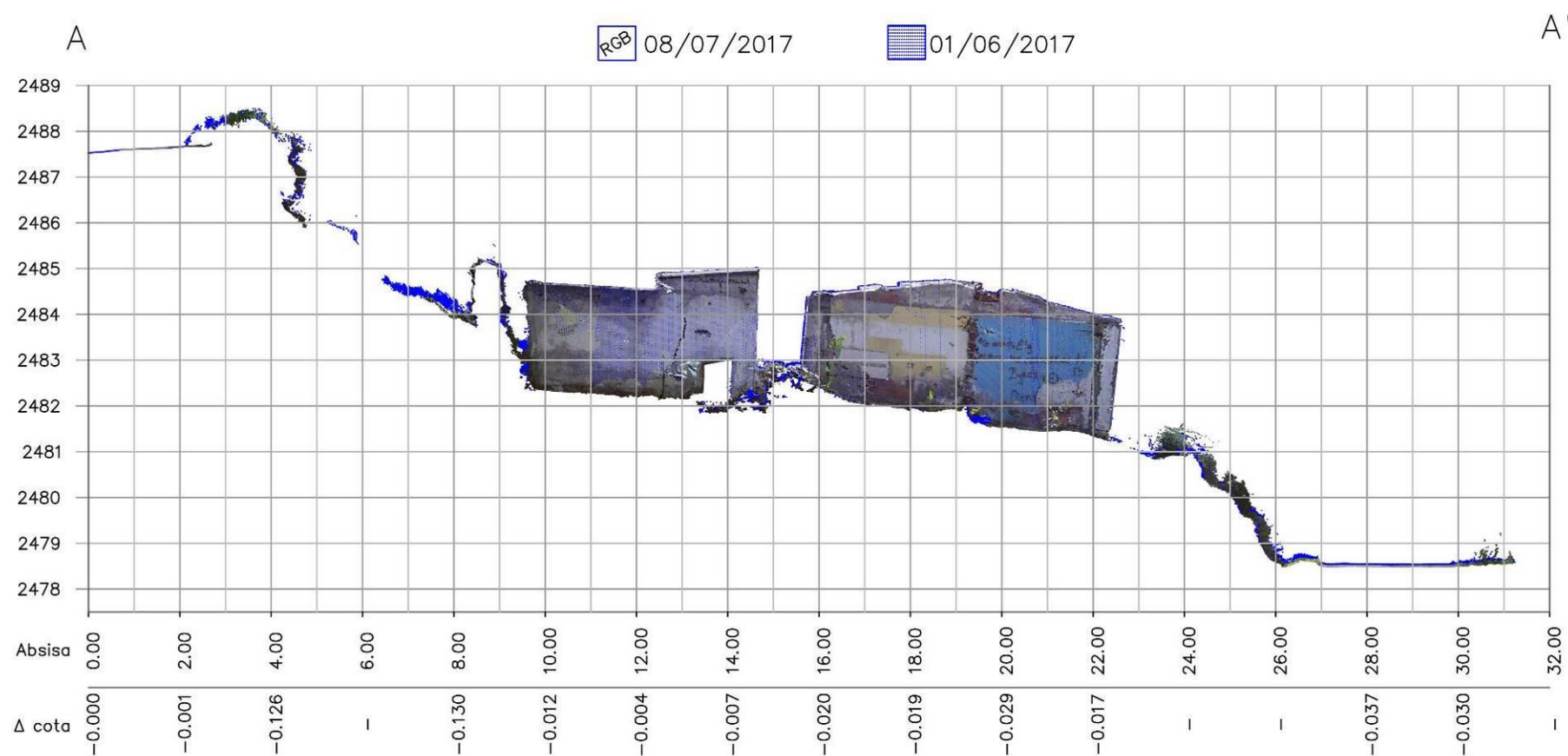


Figura 5-10 Levantamiento 2 vs levantamiento 3, perfil A-A'.



---

### 5.2.2. Perfil B-B'

La Figura 5-11 muestra el alineamiento del perfil B-B' conjuntamente con la ortofoto del levantamiento 2. En los diferentes perfiles individuales de la Figura 5-12, Figura 5-13 y Figura 5-14 se muestra tres edificaciones que han sufrido deformación en sus elementos estructurales, y dos carreteras, una en la parte superior y otra en la parte inferior del perfil. En cada perfil se observa una discontinuidad aproximadamente de un metro entre la abscisa 25.00 y 26.00 donde la terraza de la vivienda se ha desprendido, entre la abscisa 0.00 y 32.00 al inicio se muestra parte de una vivienda que se encuentra habitada pero presenta daños leves como cuarteamiento de paredes y deformación de marcos de la ventanas, la segunda vivienda de dos pisos que termina en la abscisa 32.00 presenta una inclinación ladera abajo mientras que entre la abscisa 32.00 y 42.00 la vivienda presenta un inclinación ladera arriba. En la Figura 5-8, Figura 5-9 y Figura 5-10 observamos las comparaciones de los escaneos en las diferentes fechas. Al observar la Figura 5-16, que tiene mayor espacio temporal entre levantamiento, en la abscisa 0.00 y 4.00 no existe un valor significativo del movimiento en el eje z, por lo que la estructura debe estar fuera del deslizamiento, entre la abscisa 16.00 y 32.00 se encuentra una vivienda que presenta un mayor movimiento, la terraza se desliza hacia abajo en relación al eje z alrededor de 22.1 cm y el resto de la estructura con un valor alrededor de 15.5 cm, en la abscisa 32.00 y 42.00 la vivienda presenta un deslizamiento alrededor de 13.4 cm y la carretera inferior tiene 10 cm de desplazamiento; la carretera superior no se capturó en el levantamiento 1 pero en la Figura 5-17 que compara el segundo y tercer levantamiento observamos que la parte de la carretera superior se desliza alrededor de 7.2 cm.



Figura 5-11 Alineamiento perfil B.B' – Ortografía generada a partir de la nube de puntos del LÍDAR terrestre.





Figura 5-12 Perfil B-B' levantamiento 1.

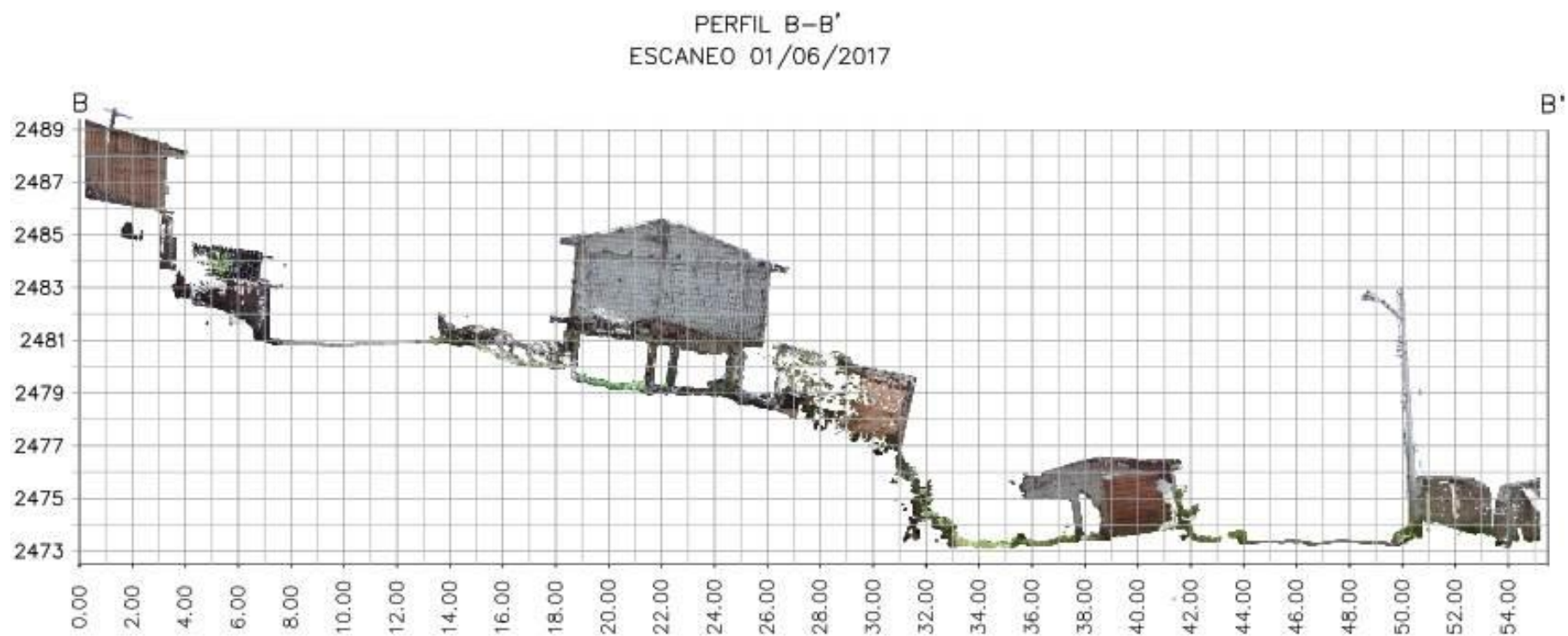


Figura 5-13 Perfil B-B' levantamiento 2.

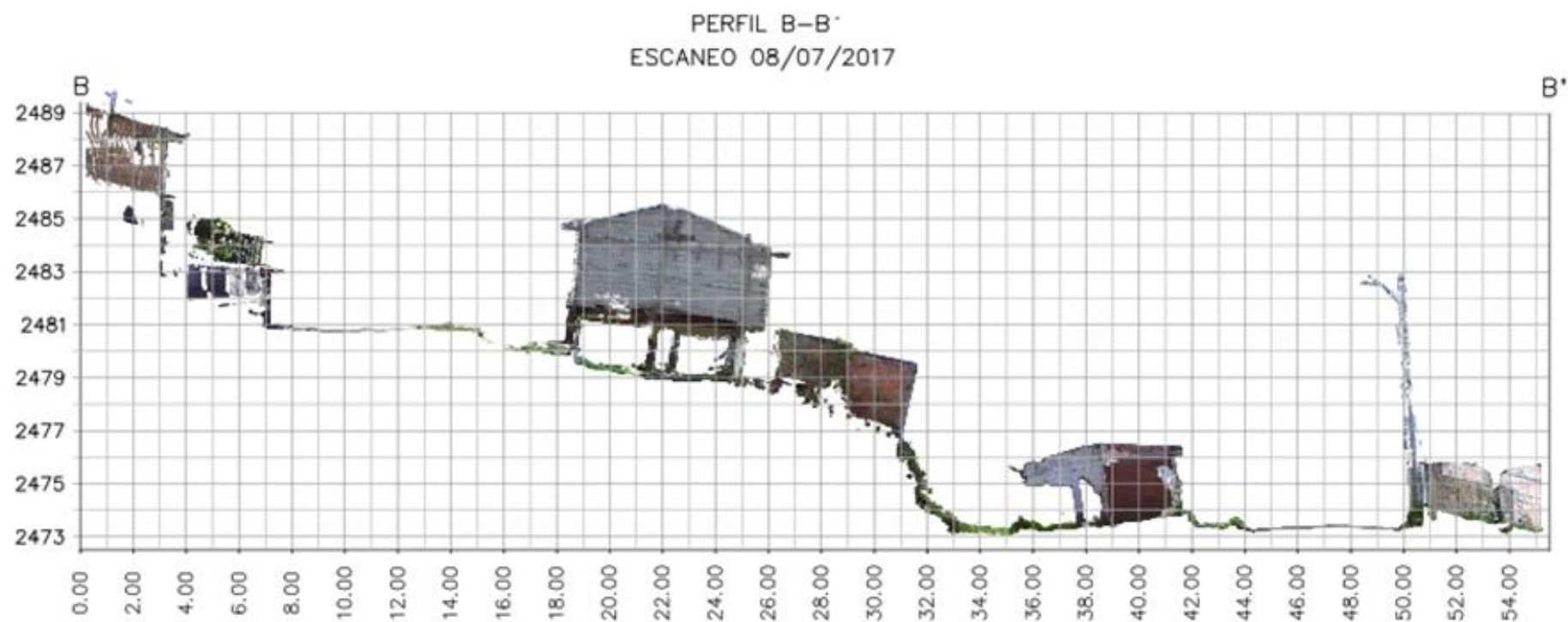


Figura 5-14 Perfil B-B' levantamiento 3.



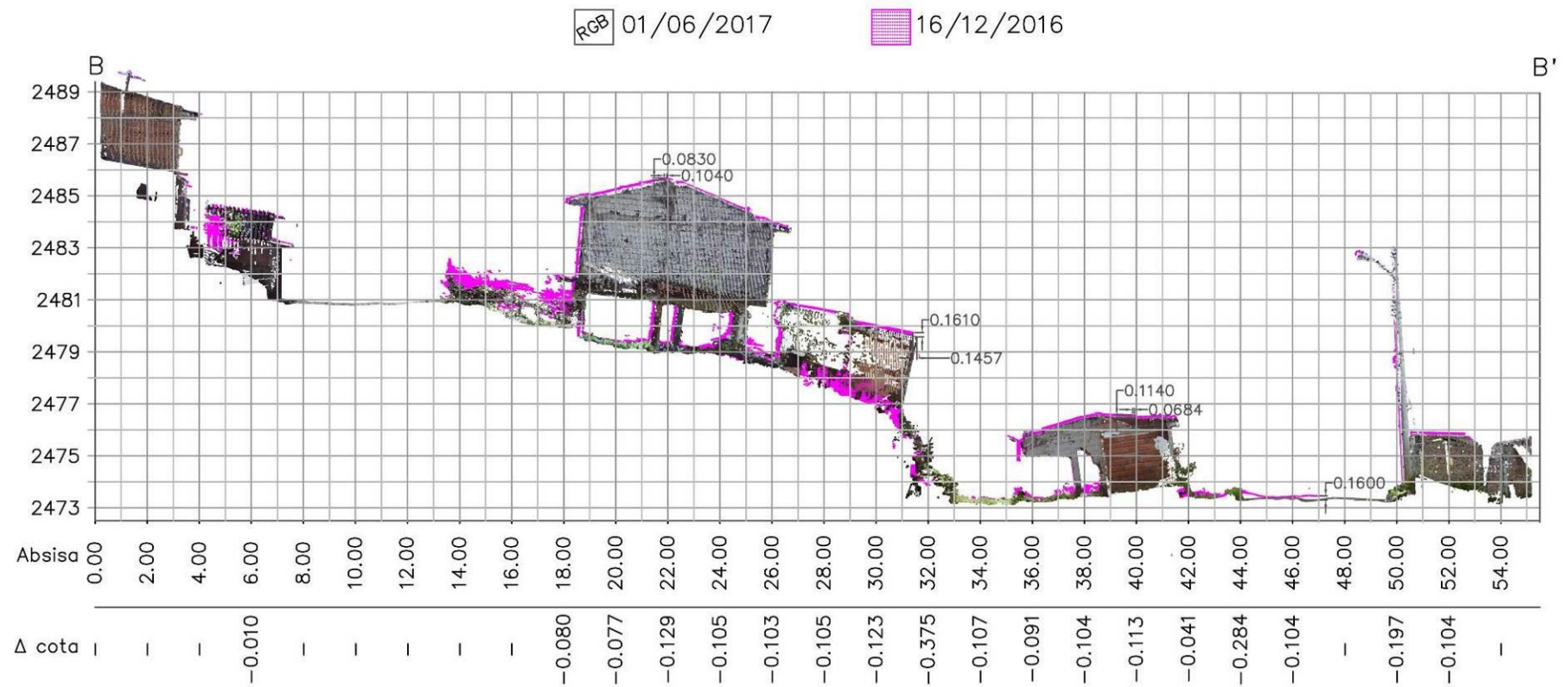


Figura 5-15 Levantamiento 1 vs levantamiento 2, perfil B-B'.

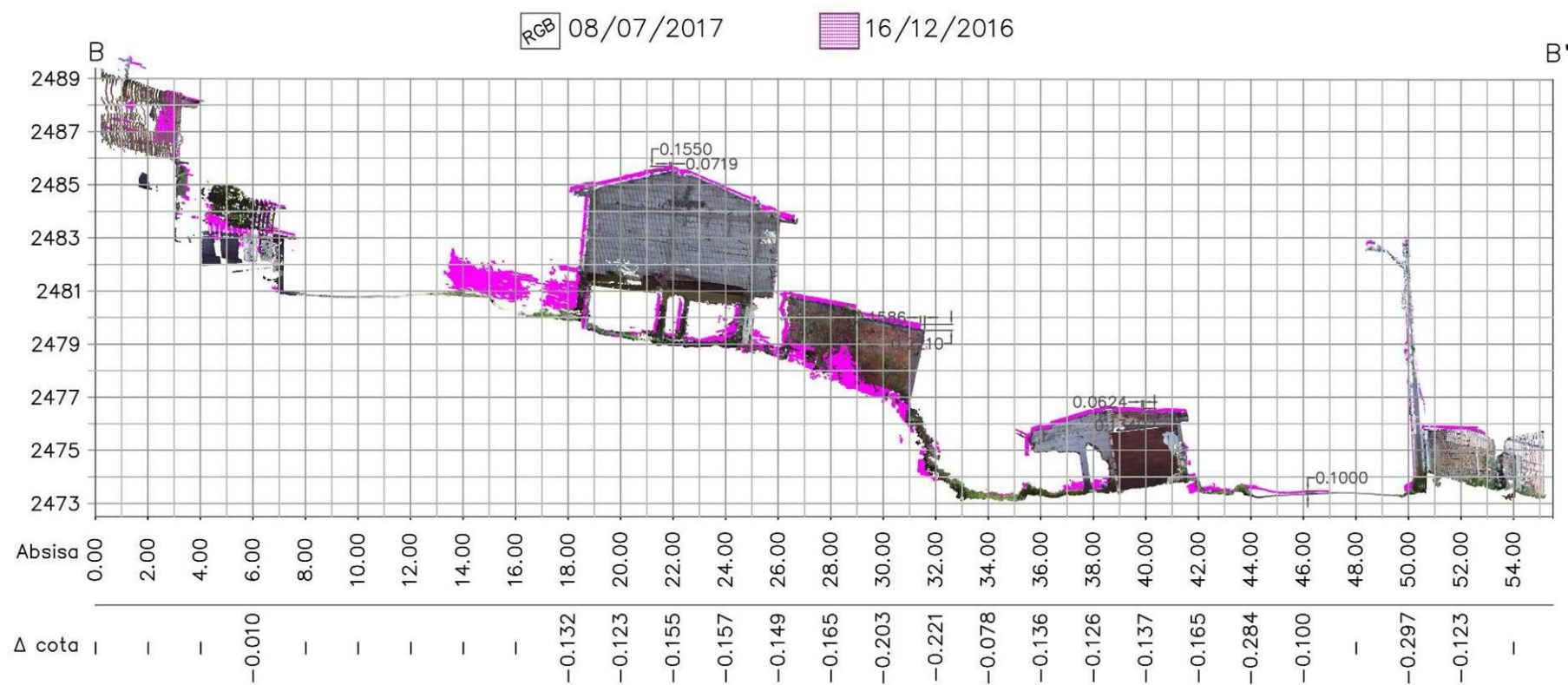


Figura 5-16 Levantamiento 1 vs levantamiento 3, perfil B-B' en metros.

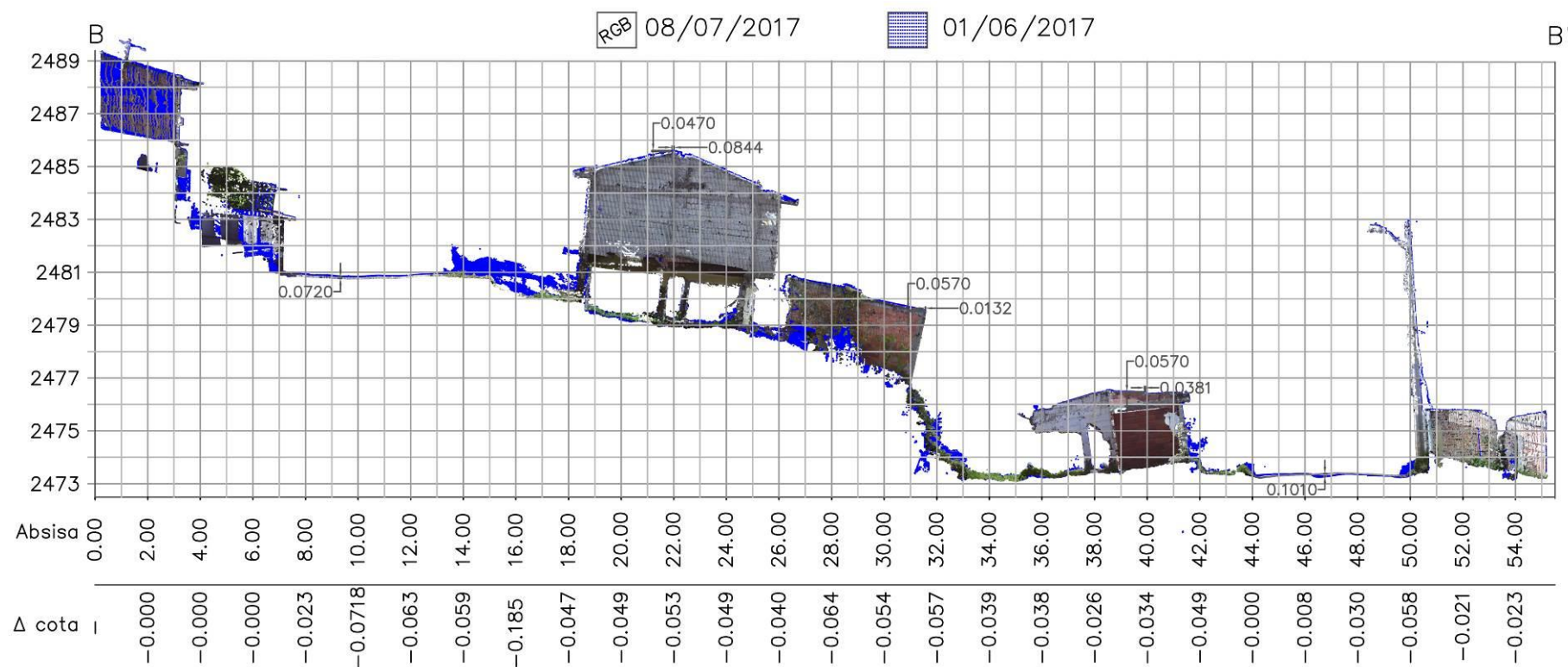


Figura 5-17 Levantamiento 2 vs levantamiento 3, perfil B-B'.

### 5.2.2.1. Analisis de edificacion BIM dentro del perfil B-B'

Para este análisis se ha mantenido el alineamiento del perfil B-B' que cruza por las dos edificaciones analizadas en la ortofoto (Figura 5-11), la edificación 1 se encuentra entre la abscisa 18.00 – 31.00 y la edificación 2 entre la abscisa 35.5 - 41.5. La Figura 5-18 y Figura 5-21 representan los modelos BIM en nube de puntos, la edificación 1 consta de una terraza entre la abscisa 22.00 - 27.50 y en la edificación 2 el patio trasero y delantero han sido eliminadas para poder apreciar mejor su comparación porque en la actualidad sus elementos estructurales están completamente destruidos. Al comparar con la nube de puntos, las edificaciones muestran semejanzas en el desplazamiento ladera abajo de sus elementos estructurales, que se puede apreciar en la vista superior de cada una (Figura 5-20 y Figura 5-23). La edificación 1 se ha movido alrededor de 3.27 metros y la edificación 2 ha sufrido una deformación máxima de 2.5 metros, esta edificación no se puede dimensionar su desplazamiento fácilmente ya que no todos sus elementos siguen la misma tendencia de movimiento. Presenta un mayor movimiento mientras más se aleja del eje horizontal y mientras más se acerca a la edificación 1.

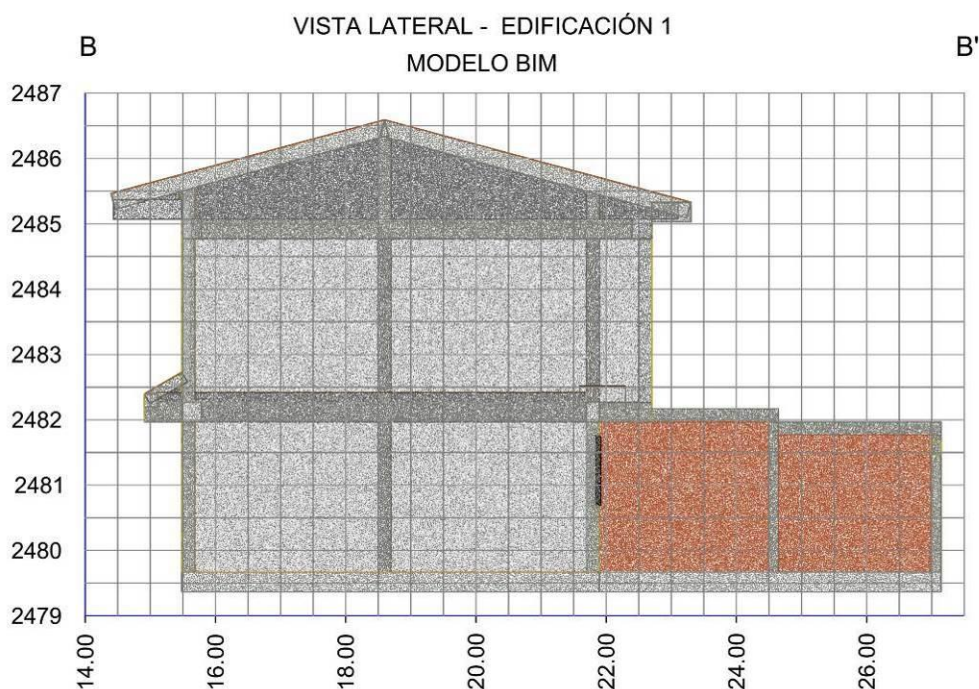


Figura 5-18 Nube de puntos edificación 1 - Vista lateral modelo BIM.



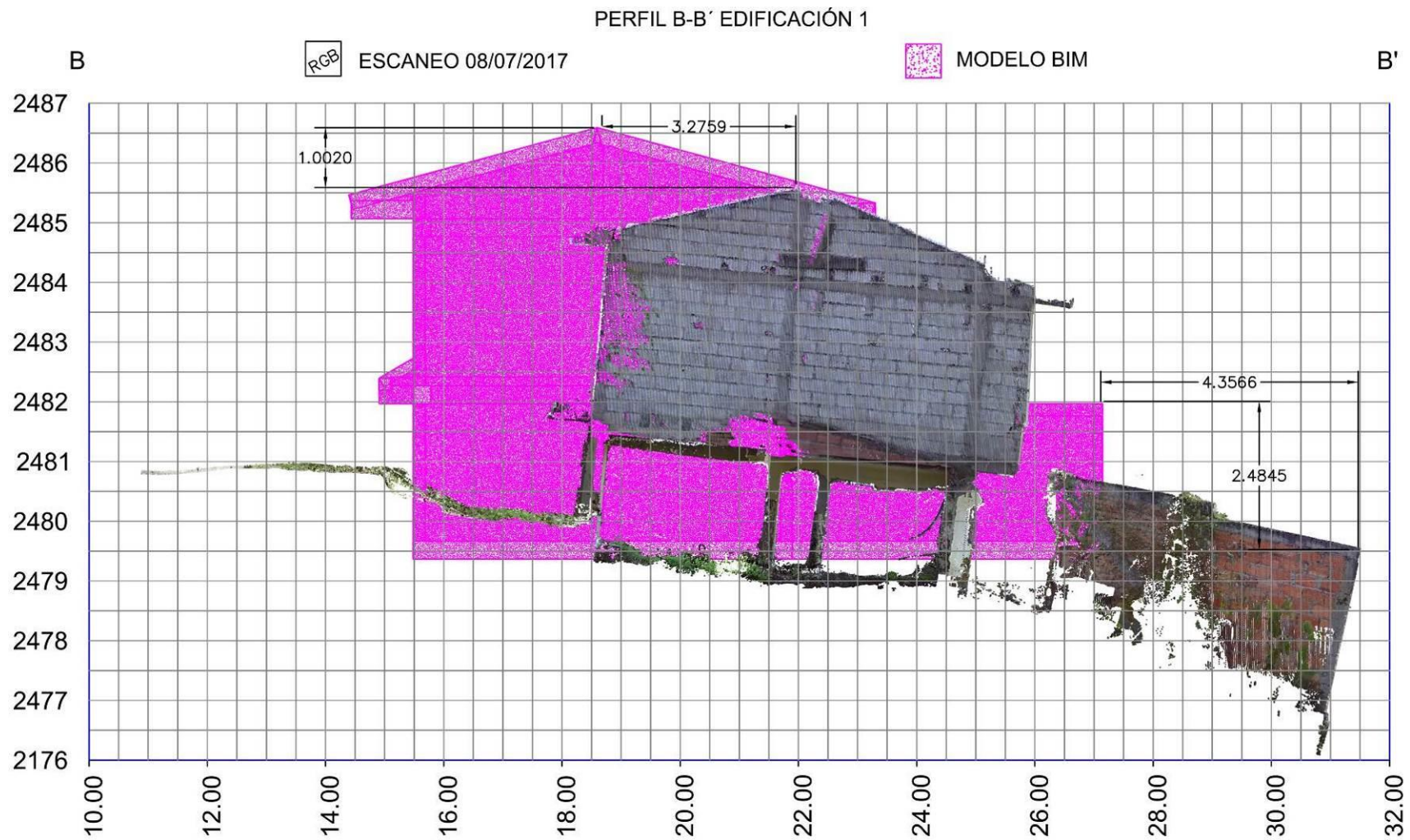


Figura 5-19 Modelo BIM vs Levantamiento 3 – Vista lateral ,Edificación 1.



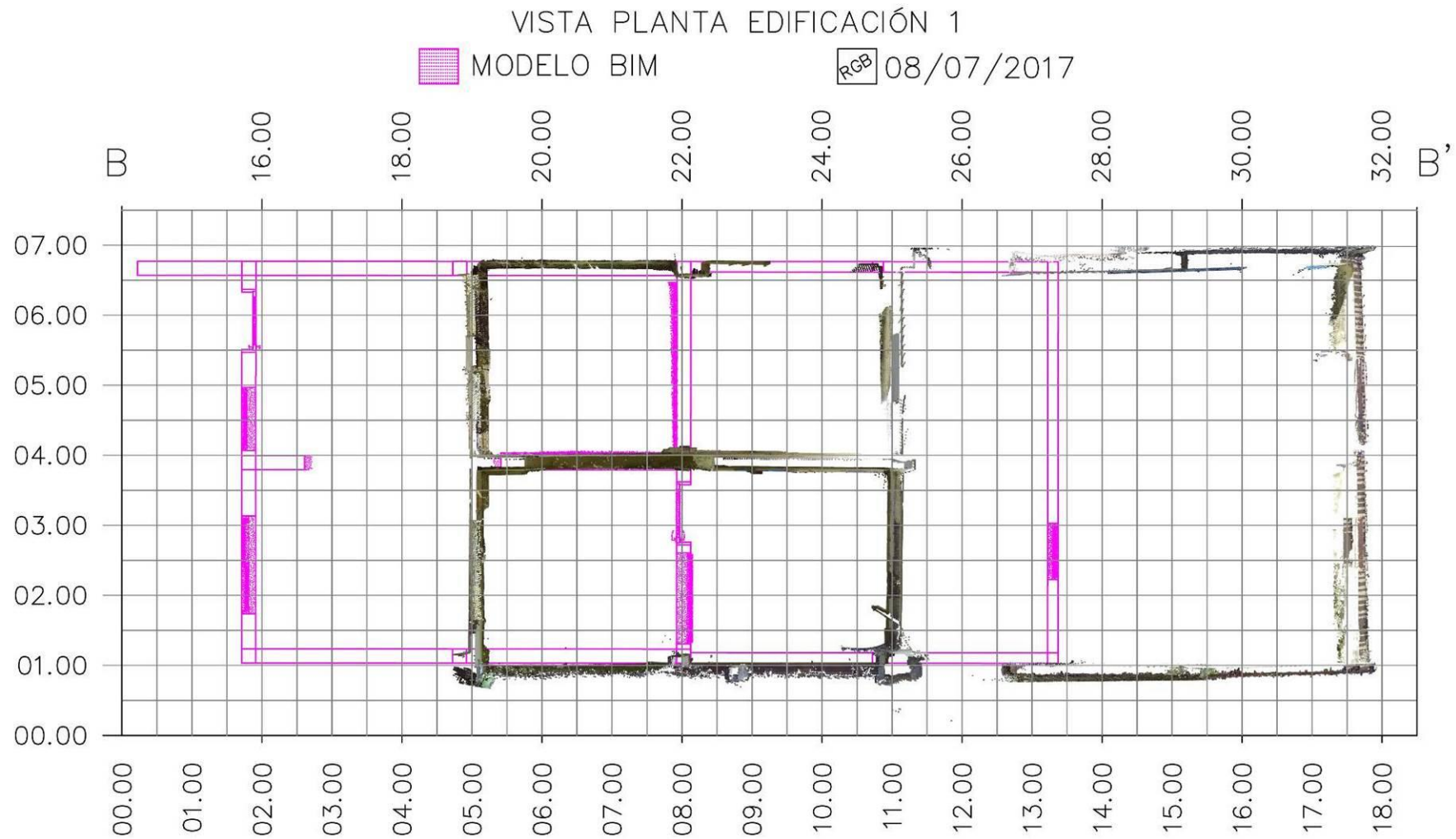


Figura 5-20 Modelo BIM vs Levantamiento 3 – Vista superior ,Edificación 1.

### VISTA LATERAL - EDIFICACIÓN 2 MODELO BIM

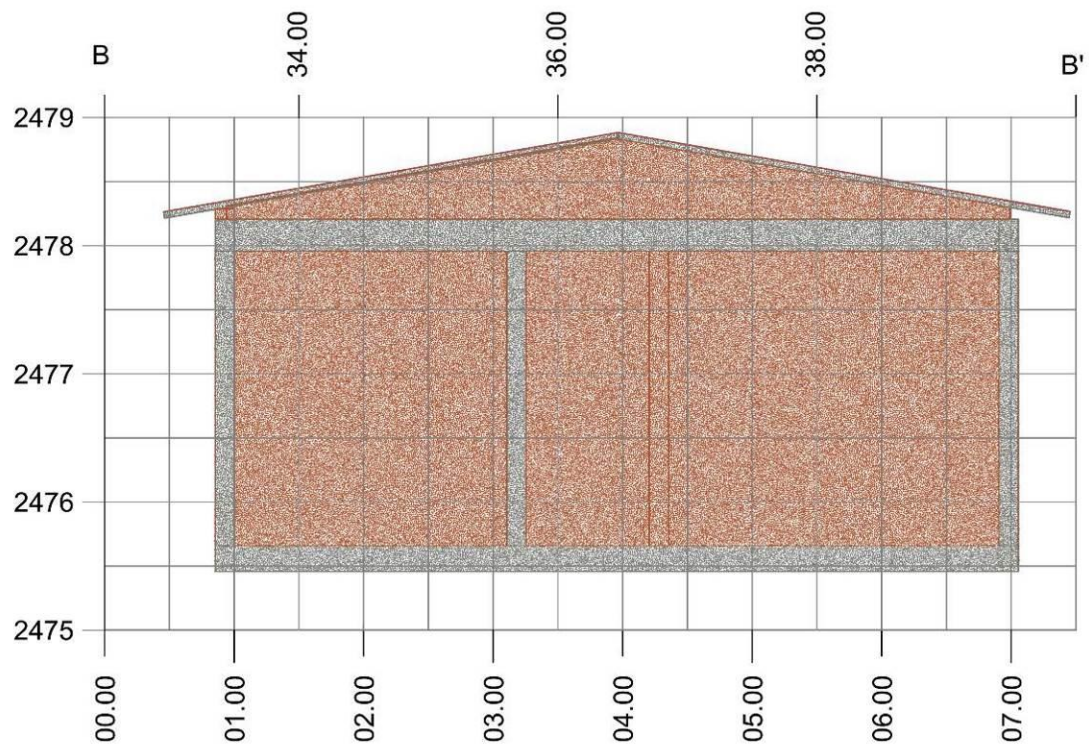


Figura 5-21 Nube de puntos edificación 2 - Vista lateral modelo BIM.

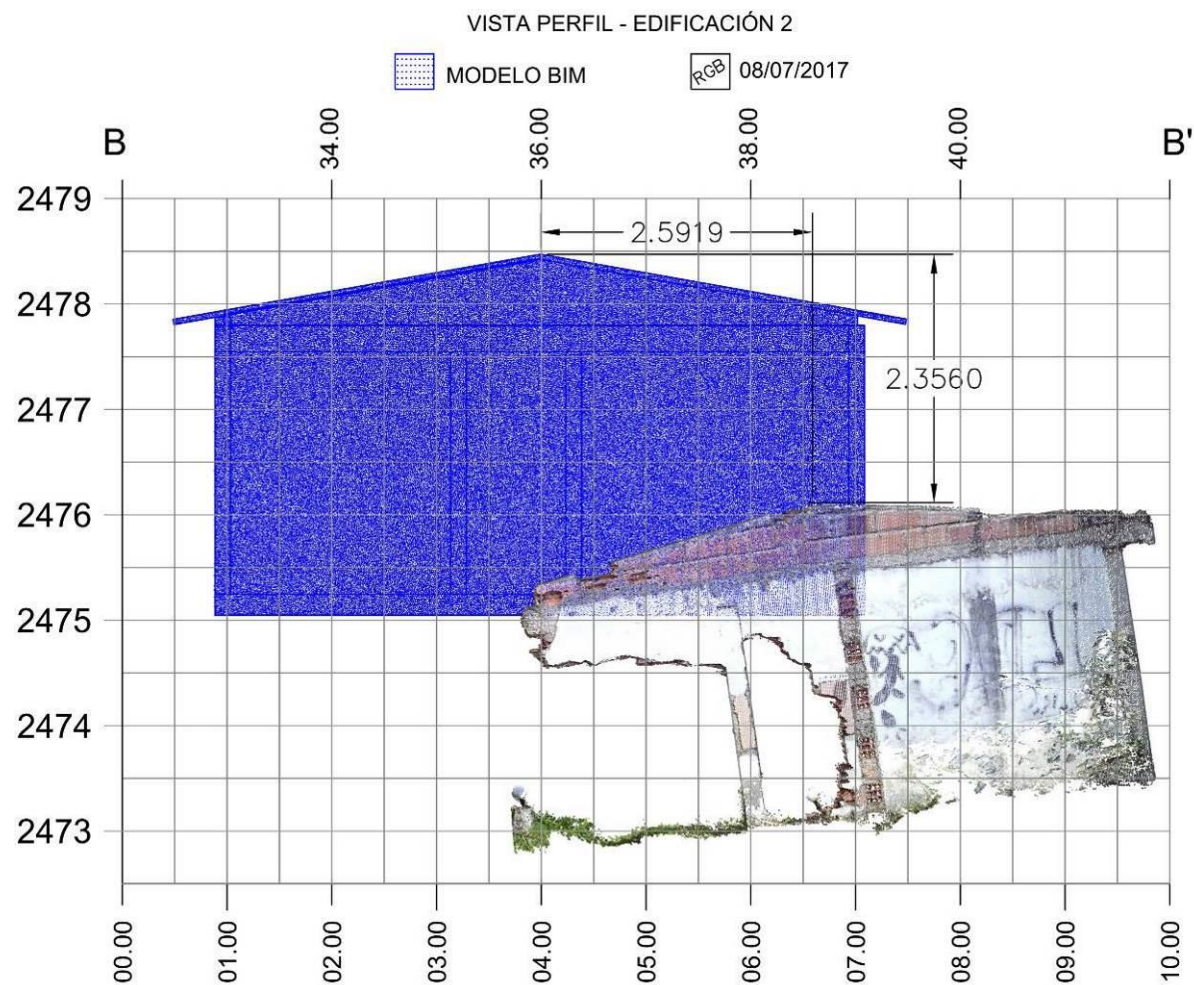
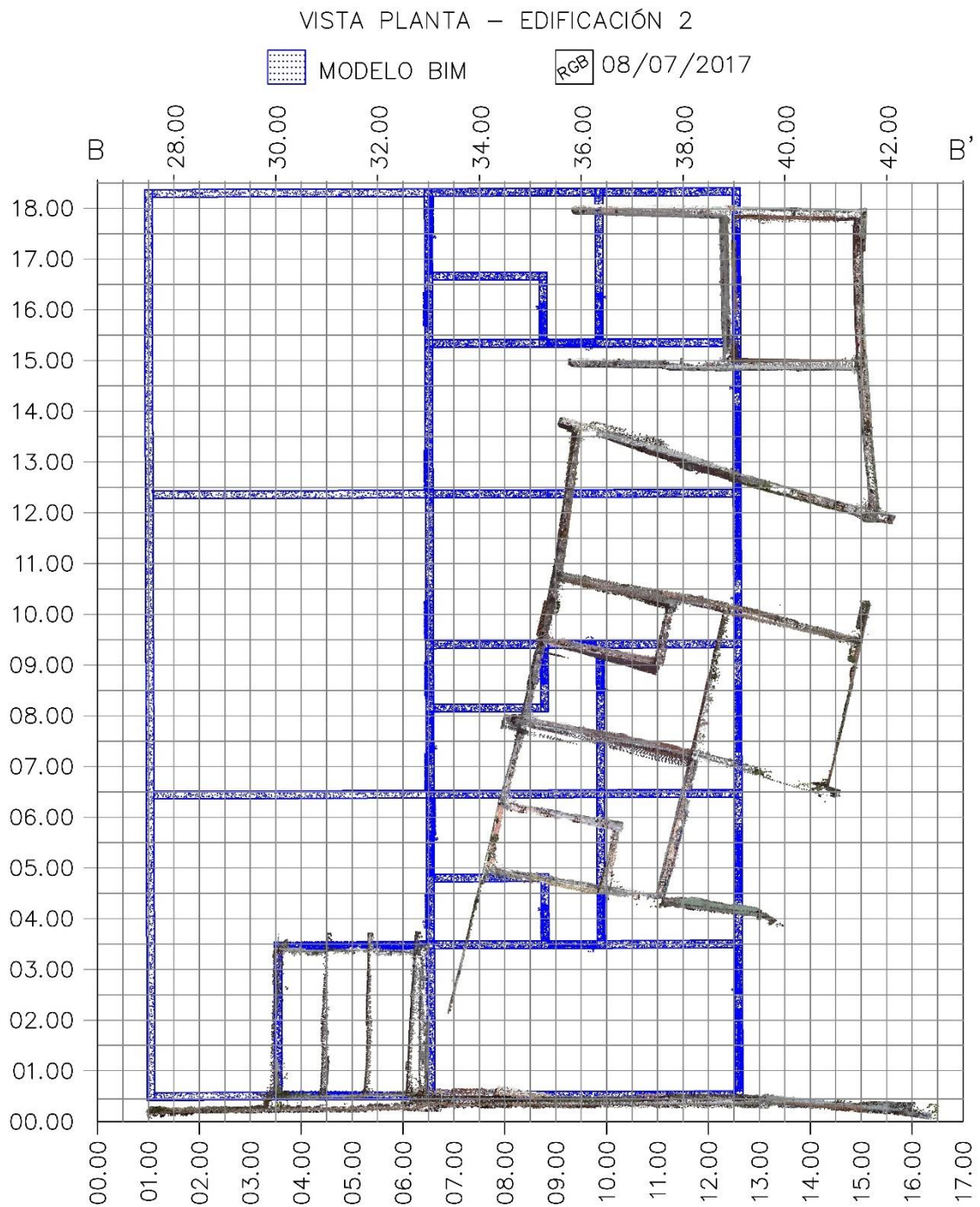


Figura 5-22 Modelo BIM vs Levantamiento 3 – Vista lateral ,Edificación 2.







---

### 5.2.3. Perfil C-C'

La Figura 5-24 muestra el alineamiento del perfil C-C' conjuntamente con la ortofoto del levantamiento 2, al observar los diferentes perfiles individuales de la Figura 5-25, Figura 5-26 y Figura 5-27 cercano en la abscisa 11.00 existen una discontinuidad del muro de aproximadamente de 50 cm y cercano a la abscisa 17.00 la pared se ha fracturado al igual que los perfiles descritos anteriormente. Cuenta con dos carreteras, una en la parte superior y otra en la parte inferior del perfil. En la Figura 5-28, Figura 5-29 y Figura 5-30 se presentan las comparaciones respectivas entre cada levantamiento. Al igual que en los anteriores perfiles las viviendas se están deslizando ladera abajo, la abscisa 24.00 divide al perfil significativamente en relación al movimiento. En la parte inferior se detectó mayor movimiento que en la parte superior, claramente nos podemos dar cuenta al observar la diferencia de cota en la guitarra de cada perfil, podemos tomar como referencia la Figura 5-26 que compara el primer y el último levantamiento donde en la parte baja se registró un hundimiento en relación del eje z de 13.2 cm y 9.6 cm en la parte superior.





Figura 5-24 Alineamiento perfil C-C' – Ortofoto generada a partir de la nube de puntos del LÍDAR terrestre.



Figura 5-25 Perfil C-C' levantamiento 1.



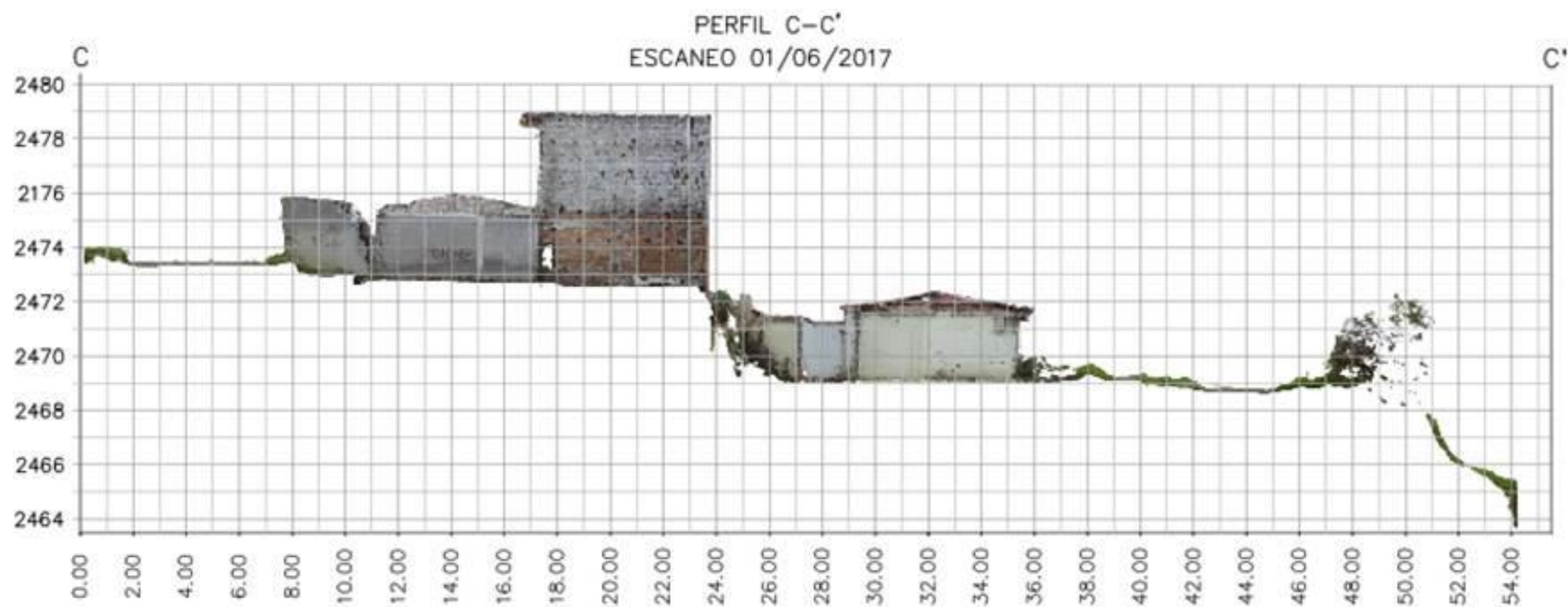


Figura 5-26 Perfil C-C' levantamiento 2.

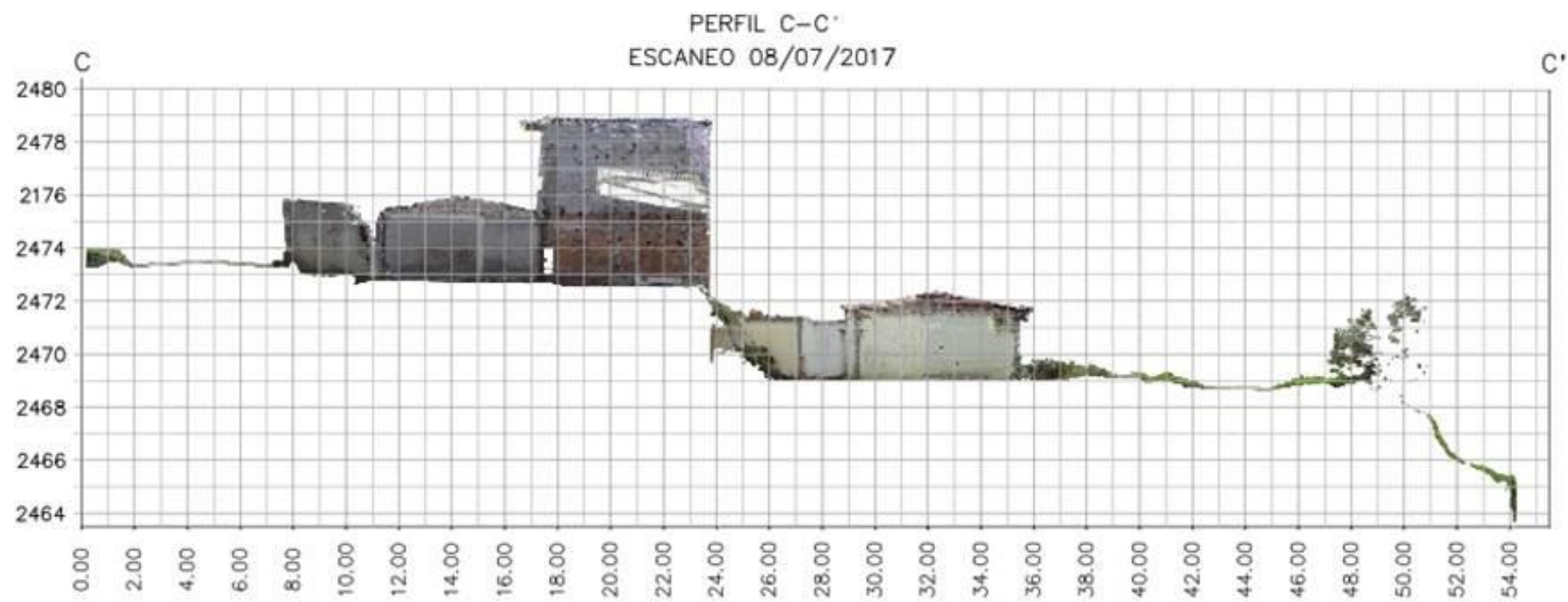


Figura 5-27 Perfil C-C' levantamiento 3.

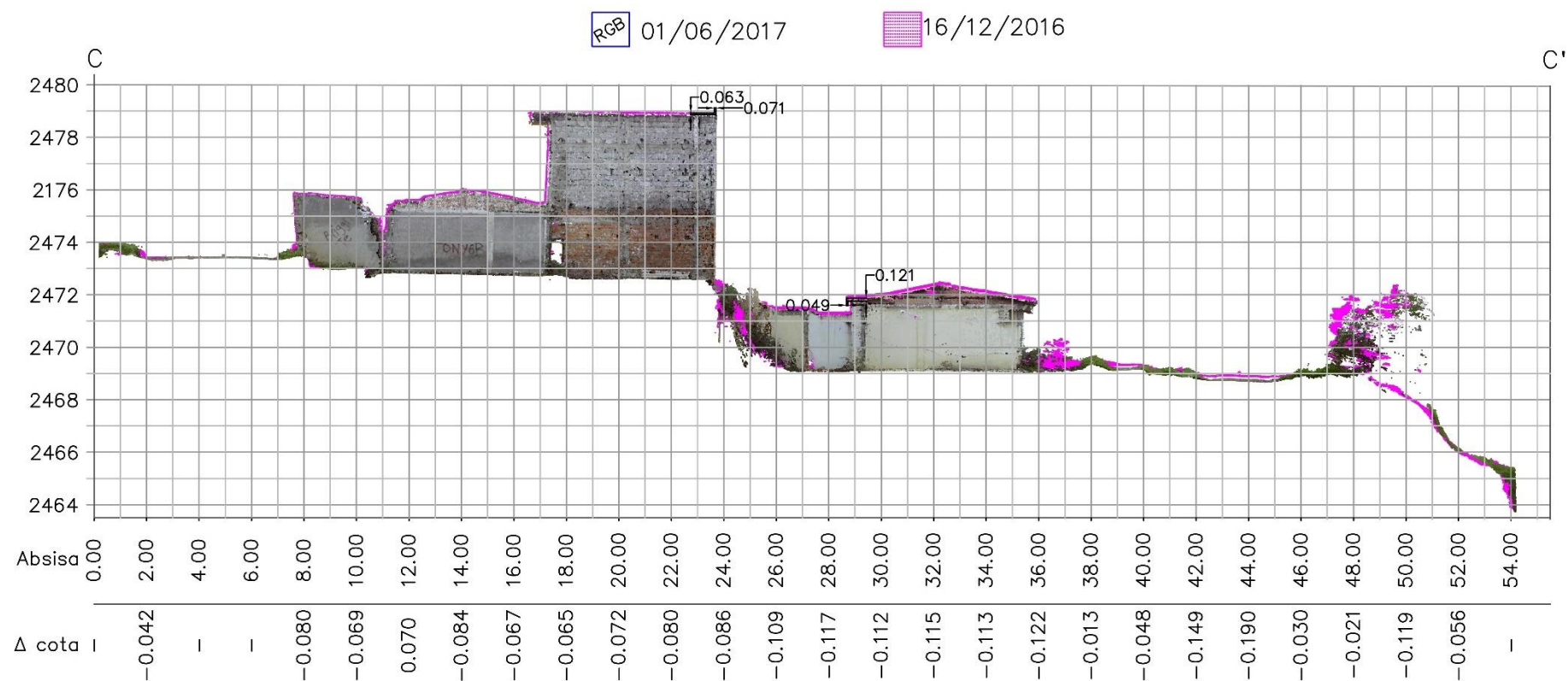


Figura 5-28 Levantamiento 1 vs levantamiento 2, perfil C-C'.



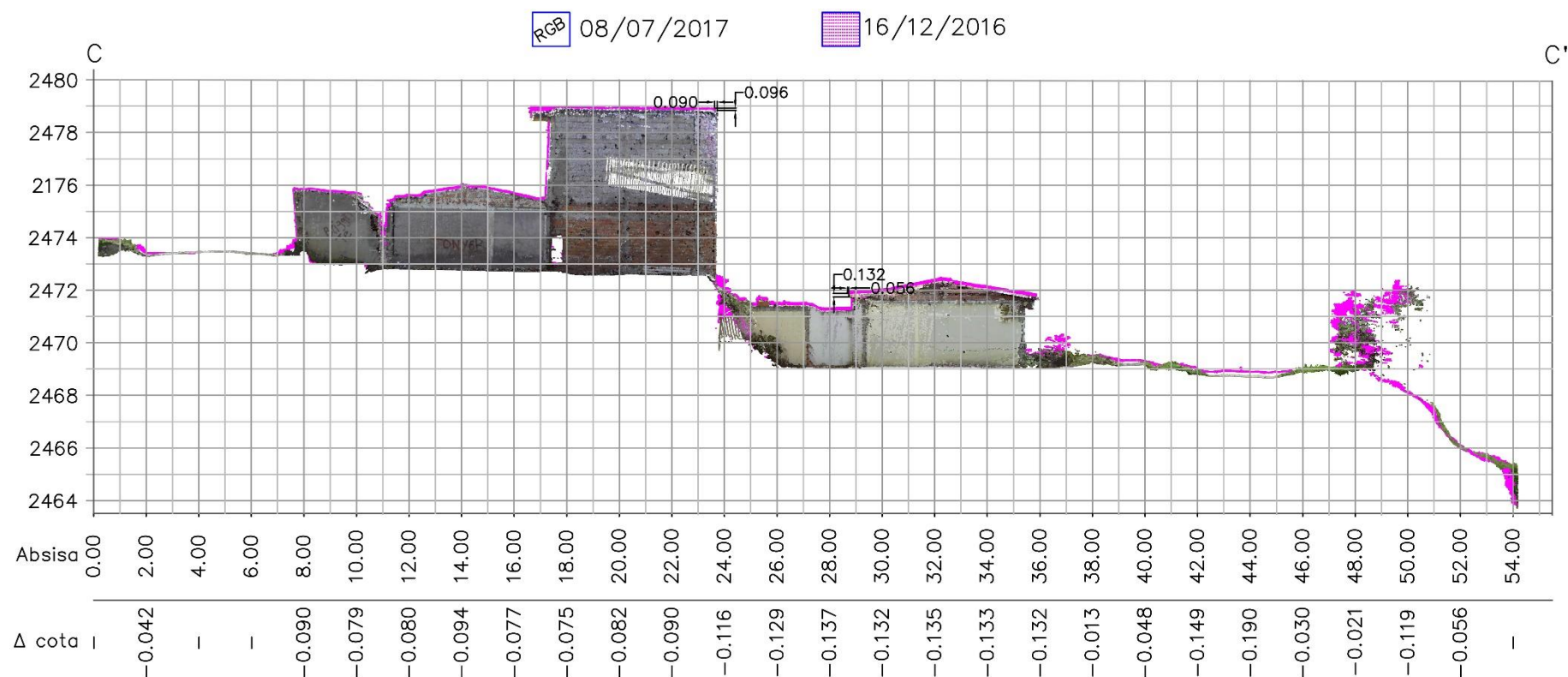


Figura 5-29 Levantamiento 1 vs levantamiento 3, perfil C-C'.

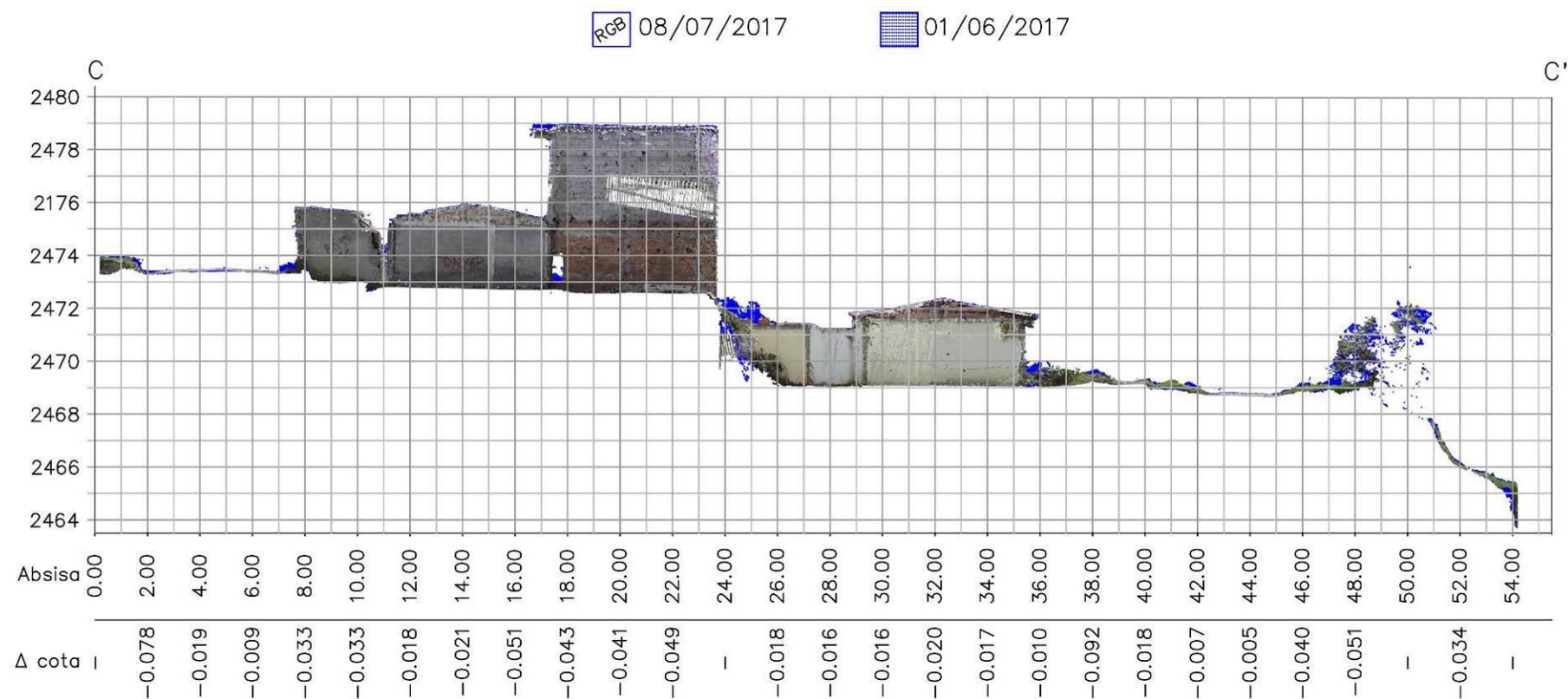


Figura 5-30 Levantamiento 2 vs levantamiento 3, perfil C-C'.



#### **5.2.4. Perfil D-D'**

La Figura 5-31 muestra el alineamiento del perfil D-D' conjuntamente con la ortofoto del levantamiento 2. Al observar los diferentes perfiles individuales de la Figura 5-32, Figura 5-33 y Figura 5-34 entre la abscisa 14.00 y 17.00 existe un muro de gaviones ya deformado. La zona está cubierta por vegetación, lo que no permitió escanear la superficie real del terreno, a pesar de eso se pudo detectar cambios en la superficie de la carretera existente entre la abscisa 6.00 y 10.00. en la Figura 5-35, Figura 5-36 y Figura 5-37, específicamente en la figura 5-33 podemos observar que la superficie se ha deslizado 12.1 cm.





Figura 5-31 Alineamiento perfil D-D' – Ortografía generada a partir de la nube de puntos del LÍDAR terrestre.

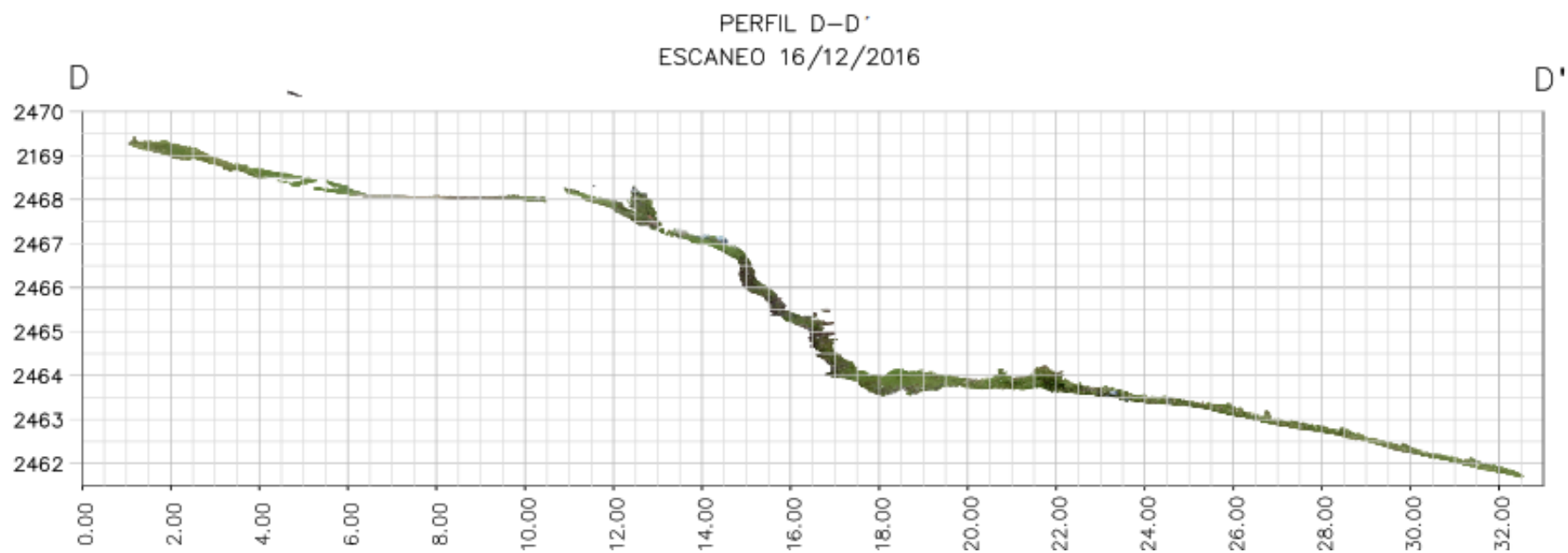


Figura 5-32 Perfil D-D' levantamiento 1.



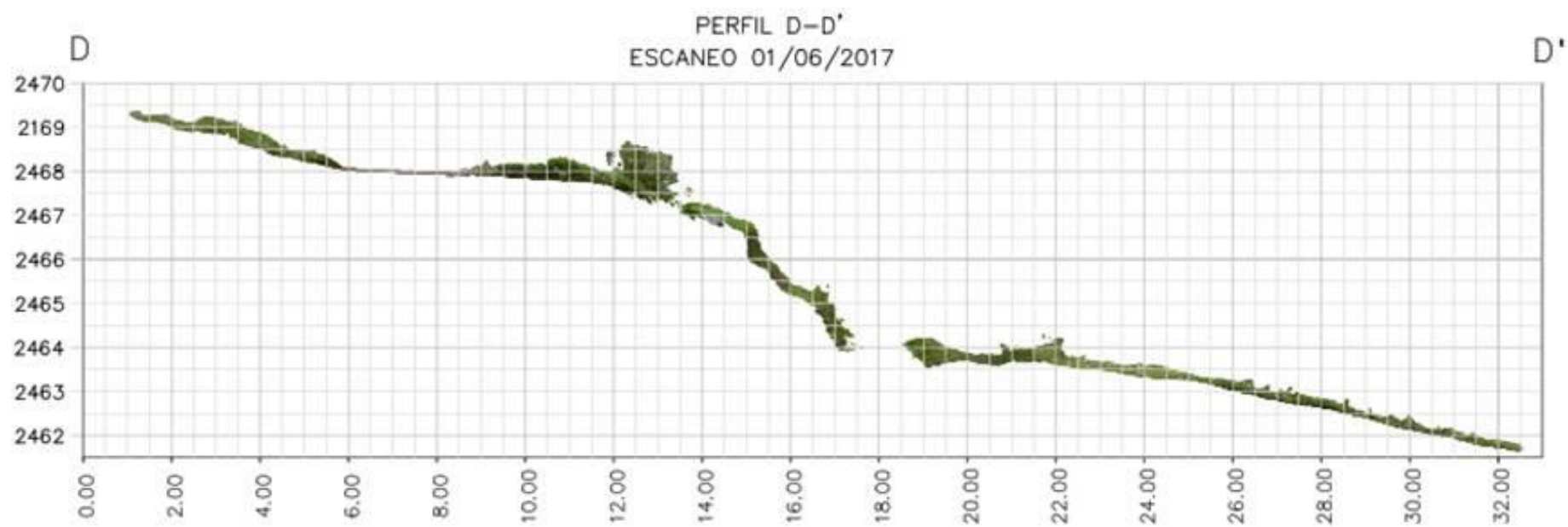


Figura 5-33 Perfil D-D' levantamiento 2.



Figura 5-34 Perfil D-D' levantamiento 3.

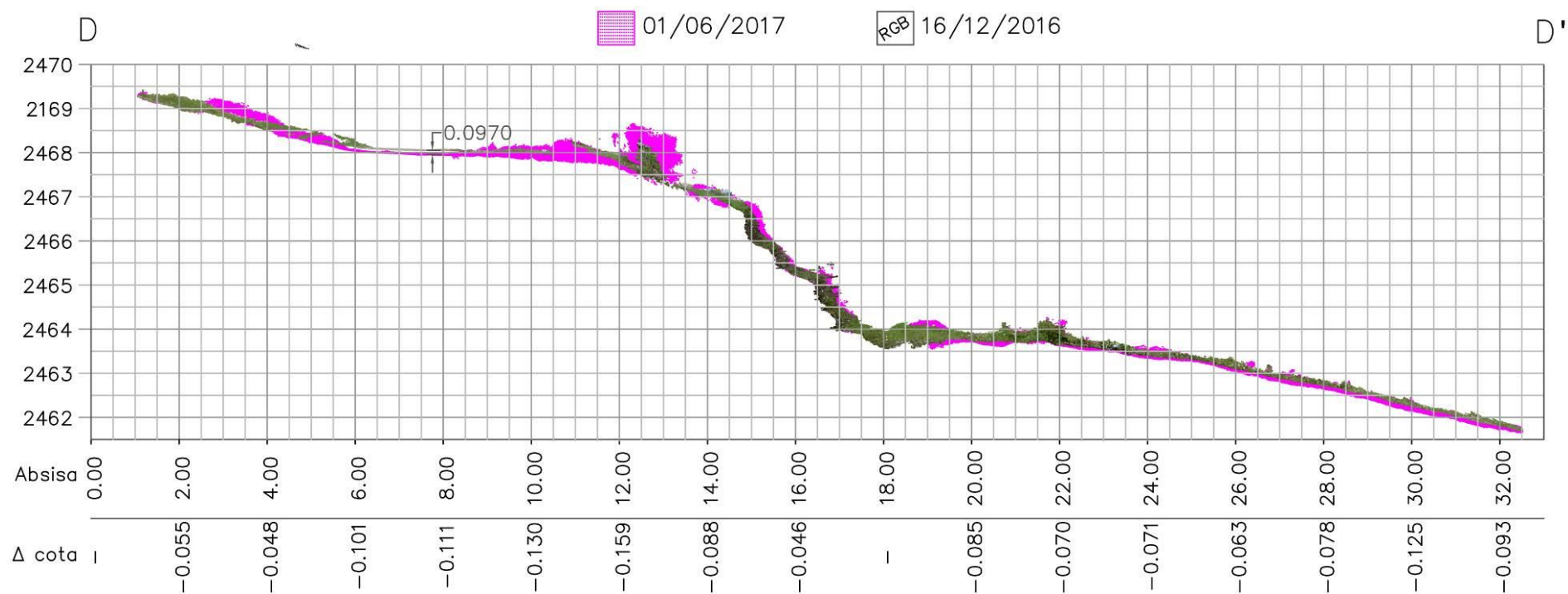


Figura 5-35 Levantamiento 1 vs levantamiento 2, perfil D-D'.

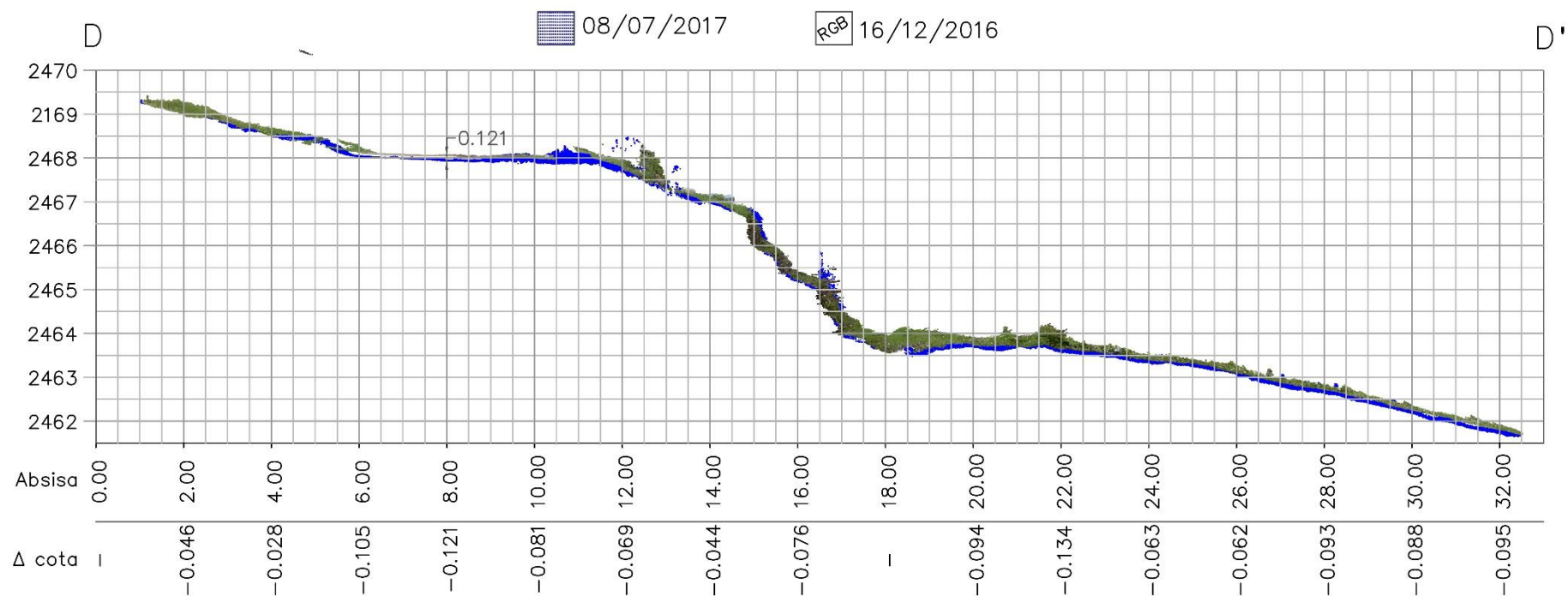


Figura 5-36 Levantamiento 1 vs levantamiento 3, perfil D-D'.

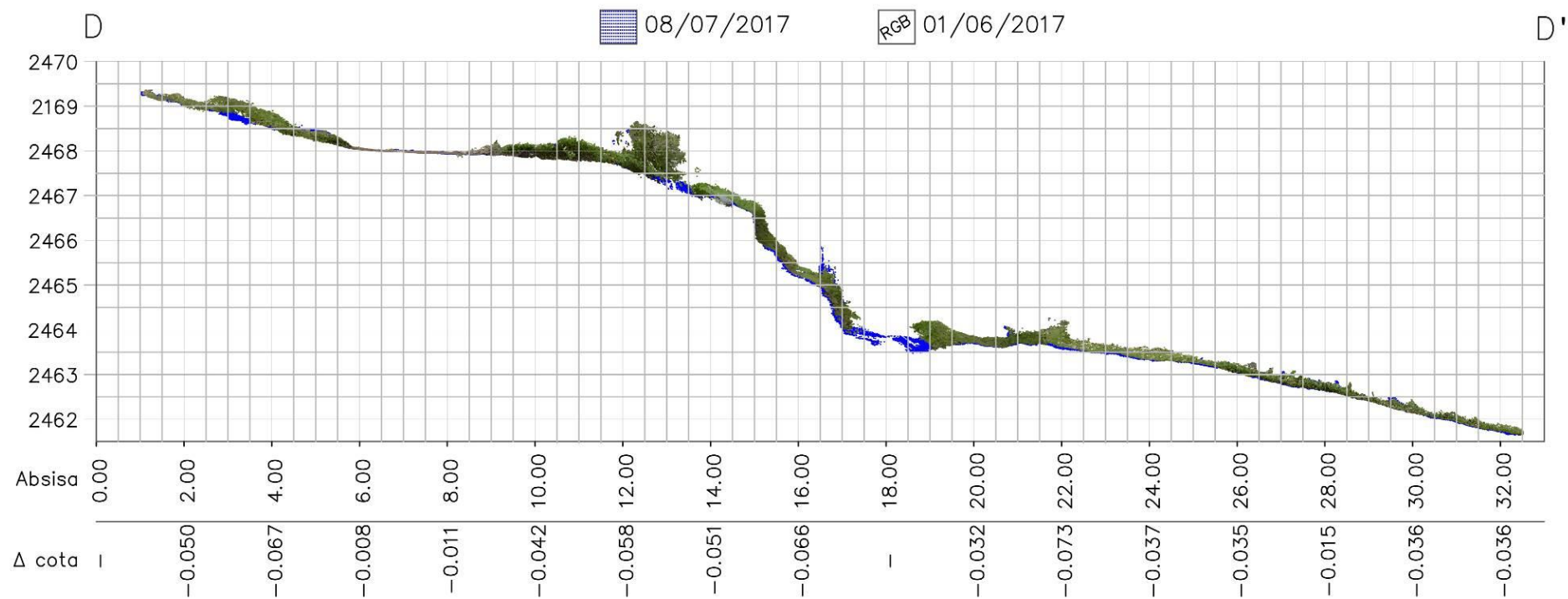


Figura 5-37 Levantamiento 2 vs levantamiento 3, perfil D-D'.

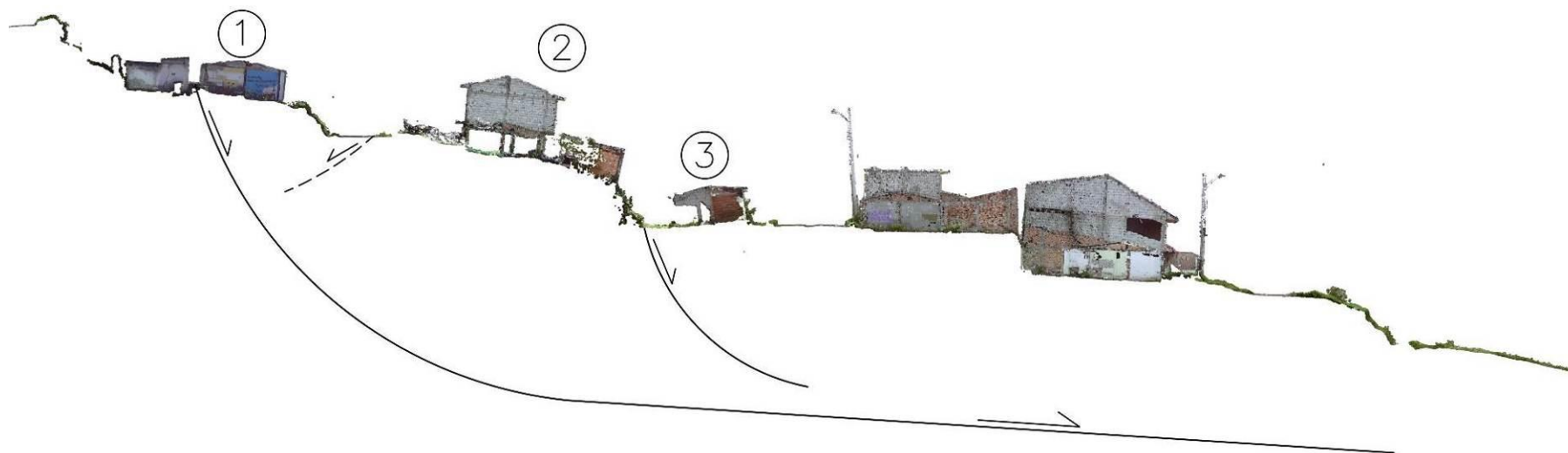




### **5.2.5. Posibles superficies de falla en base a la información obtenida.**

Con la información obtenida se pudo realizar un esquema (Figura 5-38) y podemos formular 3 supuestos:

- 1) Podemos suponer con las evidencias de los escaneos una primera superficie de deslizamiento en (1) y todas las demás deformaciones en edificios podrían ser debido las arcillas expansivas presentes en toda la zona de estudio.
- 2) Como segunda opción, pueden existir 2 superficies de deslizamientos: una en la parte superior (1) y otra debajo. La inclinación y daños a las casas (2) se debería a la expansión de arcillas.
- 3) Por último, siguiendo con las características del deslizamiento descritas en el inciso anterior pero ahora se suma una falla antitética que no se ve en superficie por el recapeo con lastre de la vía, se justifica porque las casas (1) no presentan inclinación. Igualmente sigue la acción de las arcillas expansivas en las estructuras.



*Figura 5-38 Esquema de posibles superficies de falla en el deslizamiento de la urbanización "Trigales Altos".*

### 5.3. Delimitación del deslizamiento.

En la Figura 5-39 podemos observar claramente el escarpe que se ha formado en base al deslizamiento presentado en la zona. En la Figura 5-40 se representa dos ortofotos superpuestas, la que se muestra en B/N es la ortofoto de SigTierras (2010) y la que se muestra en RGB es la ortofoto realizada con la nube de puntos mediante el LTS en el mes de Julio del 2018. En el punto 2 pertenece a la zona presentada en la Figura 5-39, donde ladera abajo también hay viviendas afectadas, pero, existen otras sin afecciones que dividen en una zona norte y sur, además que las casas presentan deformación diferentes. Como se explicó anteriormente (ver cap 5.2.2) mediante el análisis de los diferentes perfiles de nubes de puntos podemos observar que la zona más conflictiva es en el punto 1 que se encuentra en la parte intermedia cerca de la cicatriz del deslizamiento.



Figura 5-39 Escarpe principal del deslizamiento en el año 2015 y año 2017.



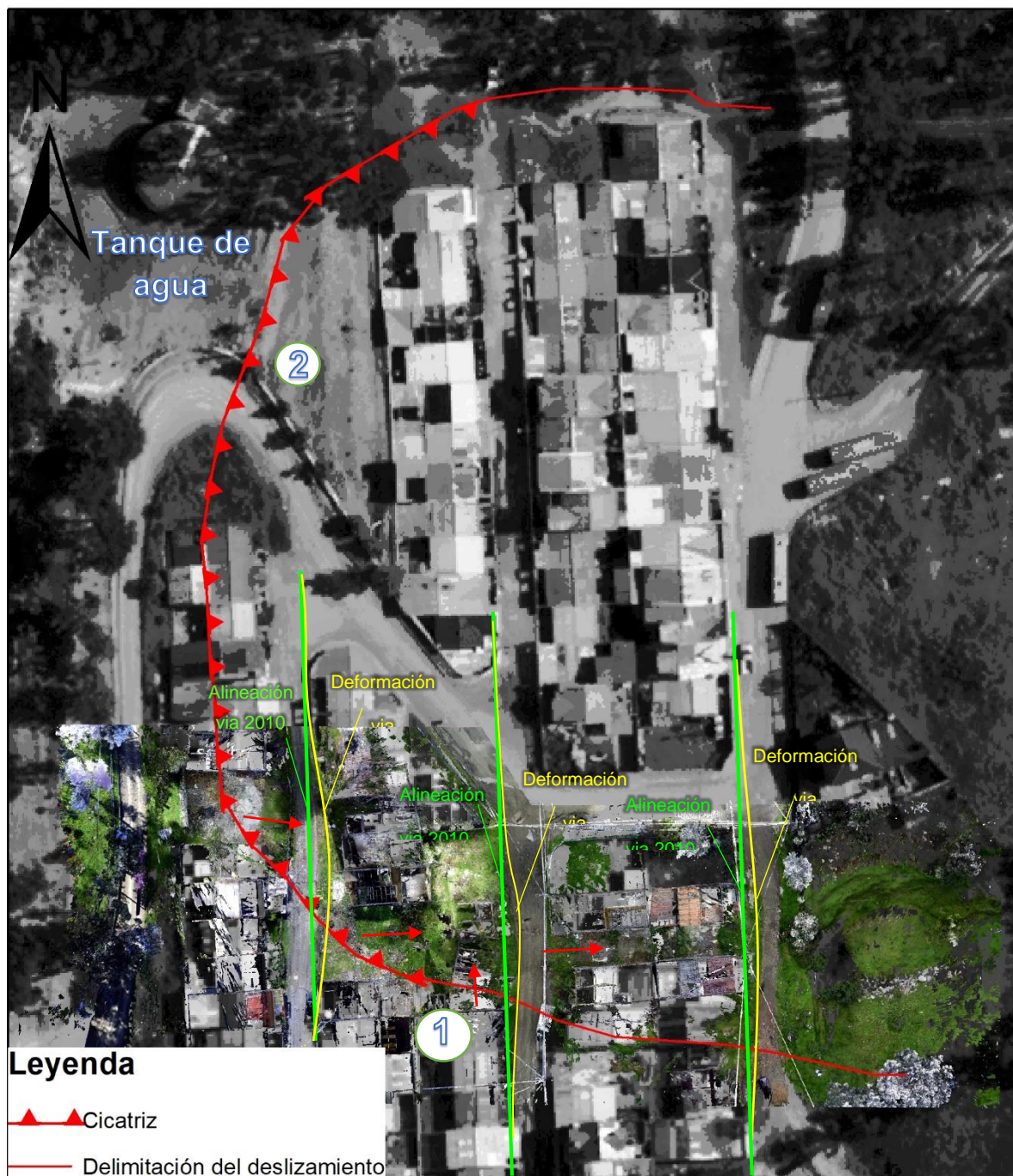


Figura 5-40 Delimitación y vectores de movimiento del deslizamiento.<<

## 5.4. Propiedades físicas y mecánicas del suelo

### 5.4.1. Propiedades físicas y mecánicas del suelo

La Tabla 5-1 y Tabla 5-2 muestran respectivamente las propiedades mecánicas del suelo de las pruebas de laboratorio realizadas y de los sondeos de la empresa Tecnosuelos (2006). En la



Tabla 5-4 se encuentran los parámetros geotécnicos que se obtuvieron mediante los ensayos geofísicos.

	Muestra	Humedad		Dh		Ds		C	C	$\phi$
		%		(kg/m <sup>3</sup> )		(kN/m <sup>3</sup> )		(kg/cm <sup>2</sup> )	(kPa)	(°)
1	M1	5,76		1500			1418			
Qt1 -5	M2	5,76	5,76	1500	1500	14,71	1418	1418	1,306	128,1
	M3	5,76		1500			1418			30,93
2	M1	18,26		2040			1810			
Arcillas	M2	16,36		2086	2054	20,129	1852	1822	2,3	225,4
	M3	13,73		2036			1804			42

Tabla 5-1 Propiedades físicas y mecánicas del suelo condiciones normales de humedad , muestras tomadas de afloramientos. Ver Figura 4-13 (pag 93).

	Dh	C	$\phi$
Descripción	KN/m <sup>3</sup>	KPa	(°)
Relleno	20,1	6,55	12
Arcilla orgánica	19,51	49,55	12
Grava arenosa	22,35	0	36
Arenisca	21,57	245,2	26

Tabla 5-2 Propiedades físicas y mecánicas del suelo (Ver anexo 10), sondeos Tecnosuelos (2006).

La

Tabla 5-3 presenta el resumen de los resultados de la clasificación de suelo y los límites de consistencia de la muestra 2. Podemos observar que el límite líquido y el índice de plasticidad la muestra de suelo puede presentar un potencial de expansión muy alto. La granulometría clasificó el suelo mediante el método SUCS como arcilla densa arenosa.

Clasificación		Grava	0%
SUCS	CH	Arena	41%
AASHTO	A - 7 -6	Finos	59%
Hum. Natural		13,93	
LL	74,10%	Lp	27,77%
Índice de plasticidad			46,33%
SUCS	Arcilla densa arenosa		

Tabla 5-3 Tabla de resumen de datos característicos de la muestra 2.



PARAMETROS GEOTÉCNICOS												
MODULOS DÍNÁMICOS												
ZONA	PROFUNDIDAD	VP	VS	DENSIDAD	MÓDULO POISSON	MÓDULO ELASTICIDAD	MÓDULO DE CORTE	MÓDULO VOLUMÉTRICO	MÓDULO EDOMETRICO	COHESIÓN	FRICCIÓN	COEFICIENTE BALASTO
				g	u	E	G	K	Eed	C	ϕ	ks
	m	m/s	m/s	kN/m³	m/m	kN/m²	kN/m²	kN/m²	kN/m²	kN/m²	kN/m²	°
Línea 1	0 a -2	388	144	14,33	0,42	85974	30270	179400	219760	20,00	3,00	2064,00
	-2 a -5	577	189	15,34	0,44	160730	55813	445773	520190	29,00	4,00	2900,00
	-5 a -8	845	201	15,58	0,47	188468	64104	1047468	1132940	29,00	4,00	3132,00
	-8 a -12	1117	219	15,92	0,48	230138	77749	1918944	2022609	36,00	5,00	3488,00
	-12 a -16	1509	296	17,16	0,48	453305	153144	3775925	3980118	57,00	9,00	5080,00
	-16 a -21	1805	354	17,95	0,48	678021	229061	5649832	5955247	74,00	12,00	6356,00
	> 21	2009	394	18,44	0,48	862686	291448	7188947	7577544	88,00	18,00	7264,00

Tabla 5-4 Parámetros geotécnicos de la línea 1 mediante expresiones empíricas.

#### 5.4.2. Tomografía sísmica

En la Figura 5-41 se muestra la alineación de los ensayos sísmicos realizados y en la Figura 5-42 y Figura 5-43 podemos observar la tomografía sísmica junto con capturas de nube de puntos en perspectiva para una visualización mejor de lo que se presume que son los estratos en la zona de estudio. Las dos líneas de los ensayos se encuentran localizados en las dos carreteras intermedias de la zona de estudio a una altura diferente con una diferencia de 7 metros entre sí. Las dos imágenes muestran que en la línea 1 y línea 2 alrededor de los 5 y 3 metros de profundidad empieza una distribución estratigráfica homogénea, anterior a esto este material heterogéneo puede presentarse por una alteración de los materiales debido a la acción antrópica para la construcción de las viviendas, alcantarillado y mejoramiento vial, podemos suponer que en la línea 1 la superficie de falla se encuentra alrededor de la cota 2477 aproximadamente 8 metros de altura y en la línea 2 alrededor de la cota 2470 a unos 6 metros de altura. Con los datos reflejados en la tomografía nuevamente podemos afirmar que no existe un relleno de una quebrada de 15 metros.

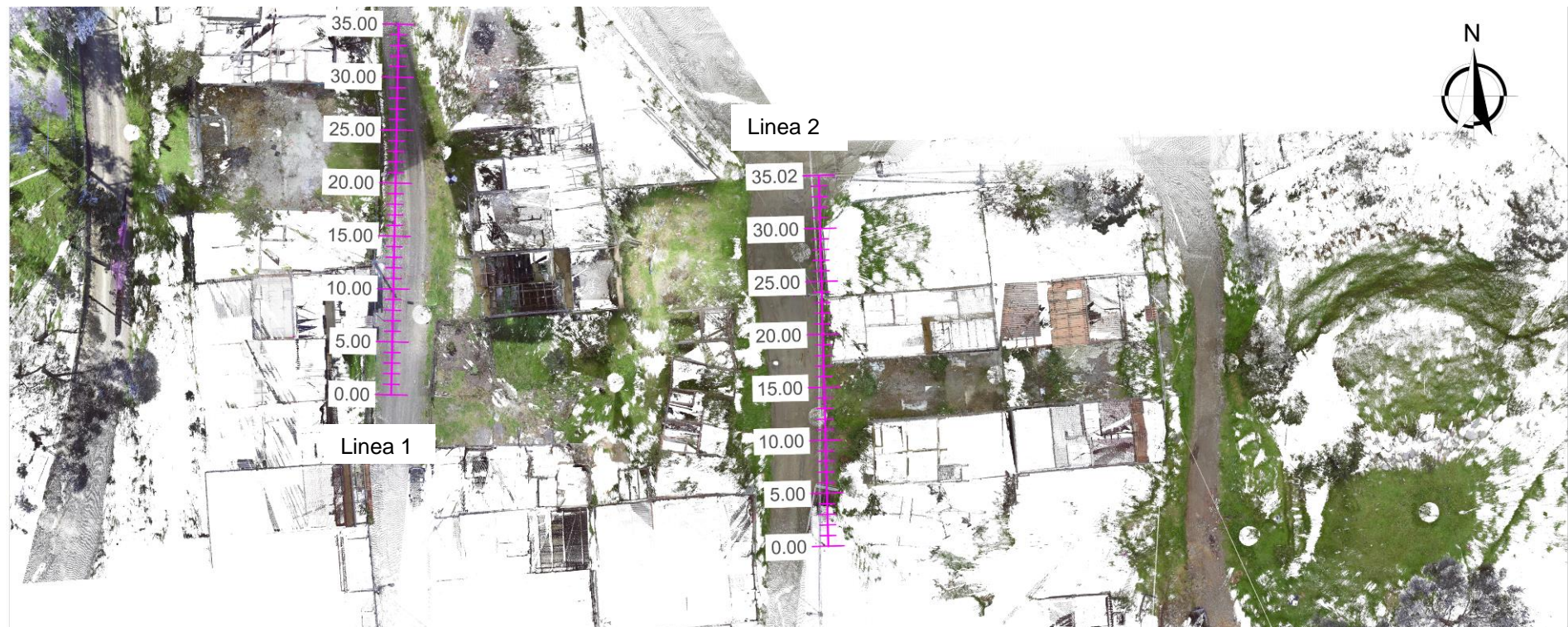


Figura 5-41 Alineación ensayos sísmicos.



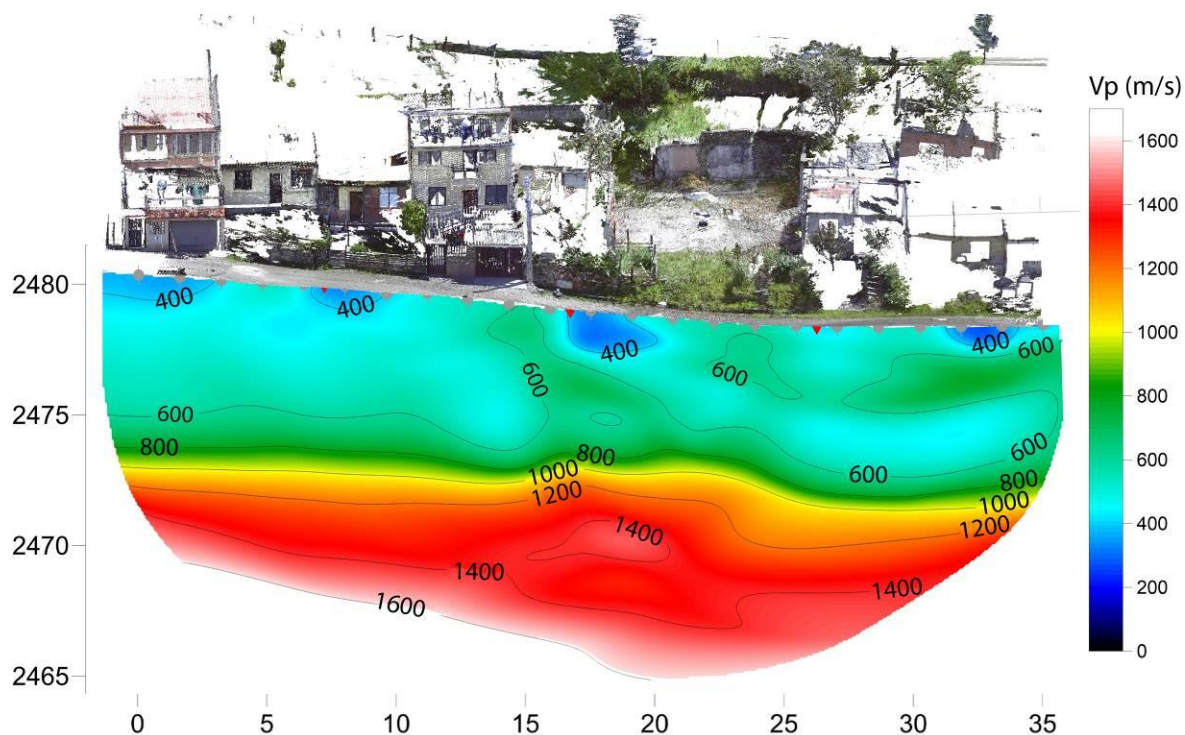


Figura 5-42 Tomografía sísmica, modelo de velocidad de ondas  $p$ , línea 1.

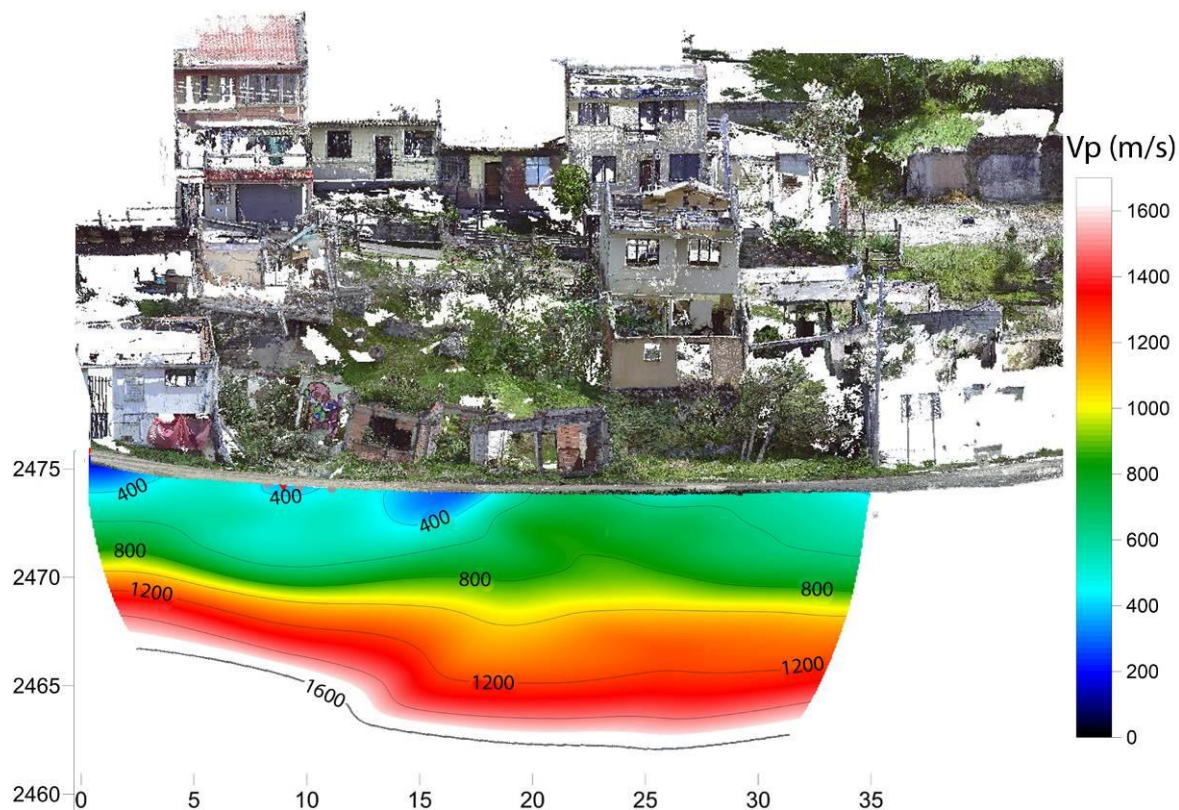


Figura 5-43 Tomografía sísmica, modelo de velocidad de ondas  $p$  línea 2.



---

### 5.5. Factor de Seguridad en condiciones secas, húmedas y con aceleración sísmica.

Se ha modelado en Slide la ladera con las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de la zona de estudio (ver Tabla 5-2 pag 149) obtenidos por la empresa Tecnosuelos (2006). Considerando que son los estudios más completos que se han hecho en la zona, como no se pudieron encontrar las características del suelo en condiciones saturadas y debido al caso improbable de que el nivel freático alcance la superficie de terreno únicamente se obtuvo el factor de seguridad (F.S.) con el método de Bishop simplificado. El F.S. en condiciones normales de humedad es de 0.6 (ver Figura 5-44) y en el caso de verse afectado por la aceleración sísmica máxima en roca esperado en el sitio para un período de retorno de 475 años proporcionado por la NEC son de  $K_h=0.125$  y  $K_v=0.0625$  (ver cap 3.1.7), el F.S. es de 0.5 (ver Figura 5-46). Se modeló la ladera como un terreno natural sin edificaciones y muros, por esta razón el factor de seguridad falla en taludes empinados, en las Figura 5-45 y Figura 5-47 se representa todos los círculos de falla posibles con  $F.S. < 4$  lo que nos permite observar que efectivamente la ladera en condiciones normales de humedad podría considerarse estable y no segura ( $1 < F.S. < 1,5$ ), en cambio en condiciones con acción sísmica la ladera es inestable ( $FS < 1$ ).

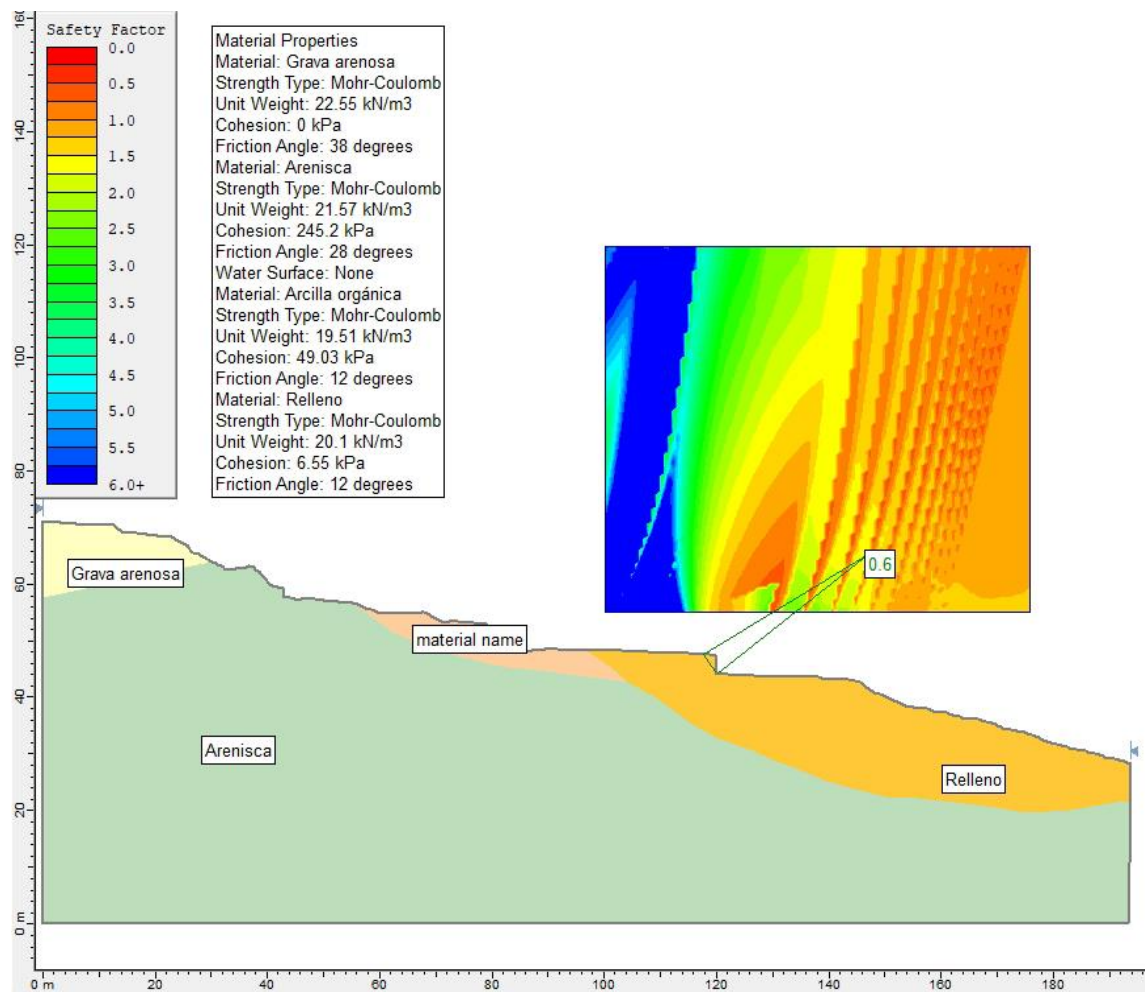


Figura 5-44 F.S. de la ladera en condiciones normales de humedad (F.S. = 0.6).



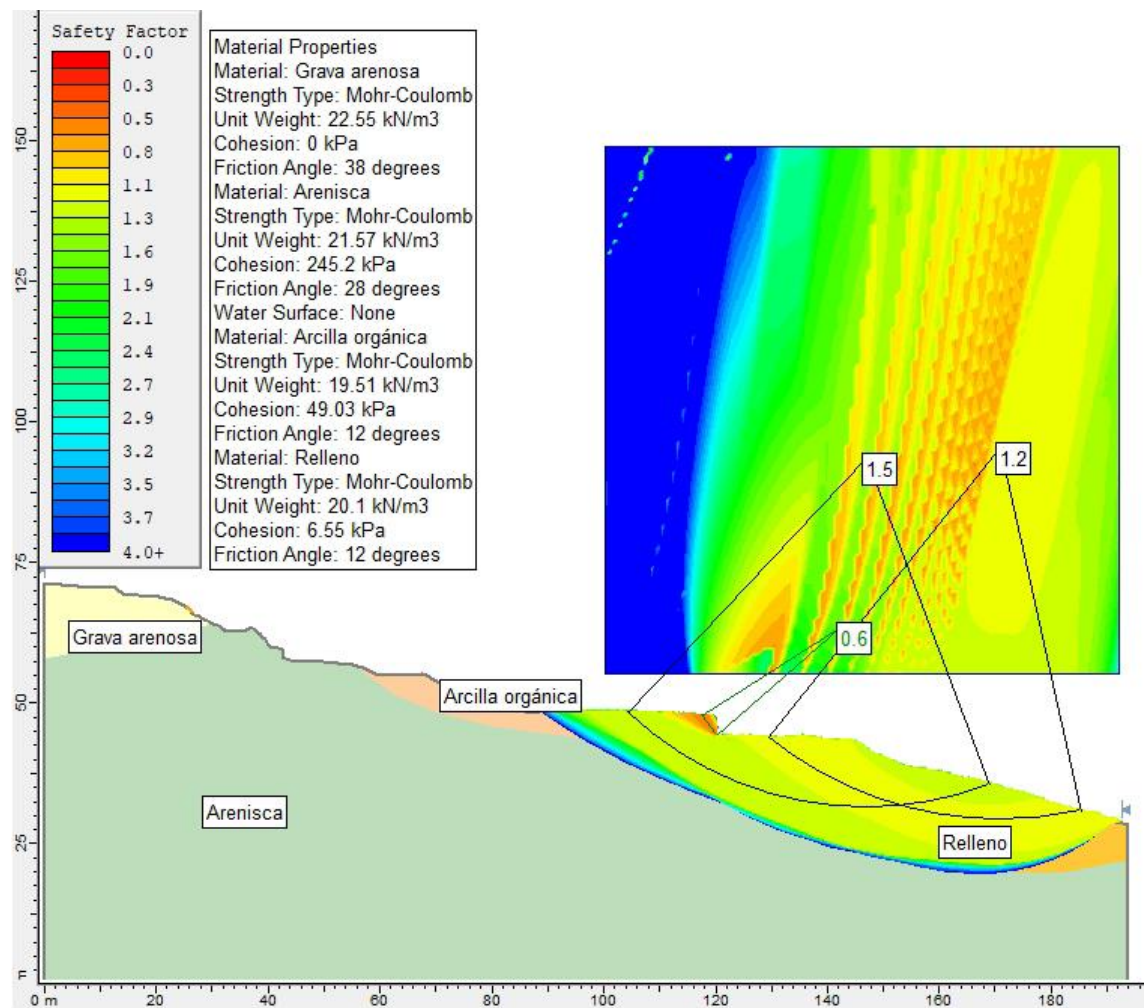


Figura 5-45 Superficies de falla de la ladera en condiciones normales de humedad.

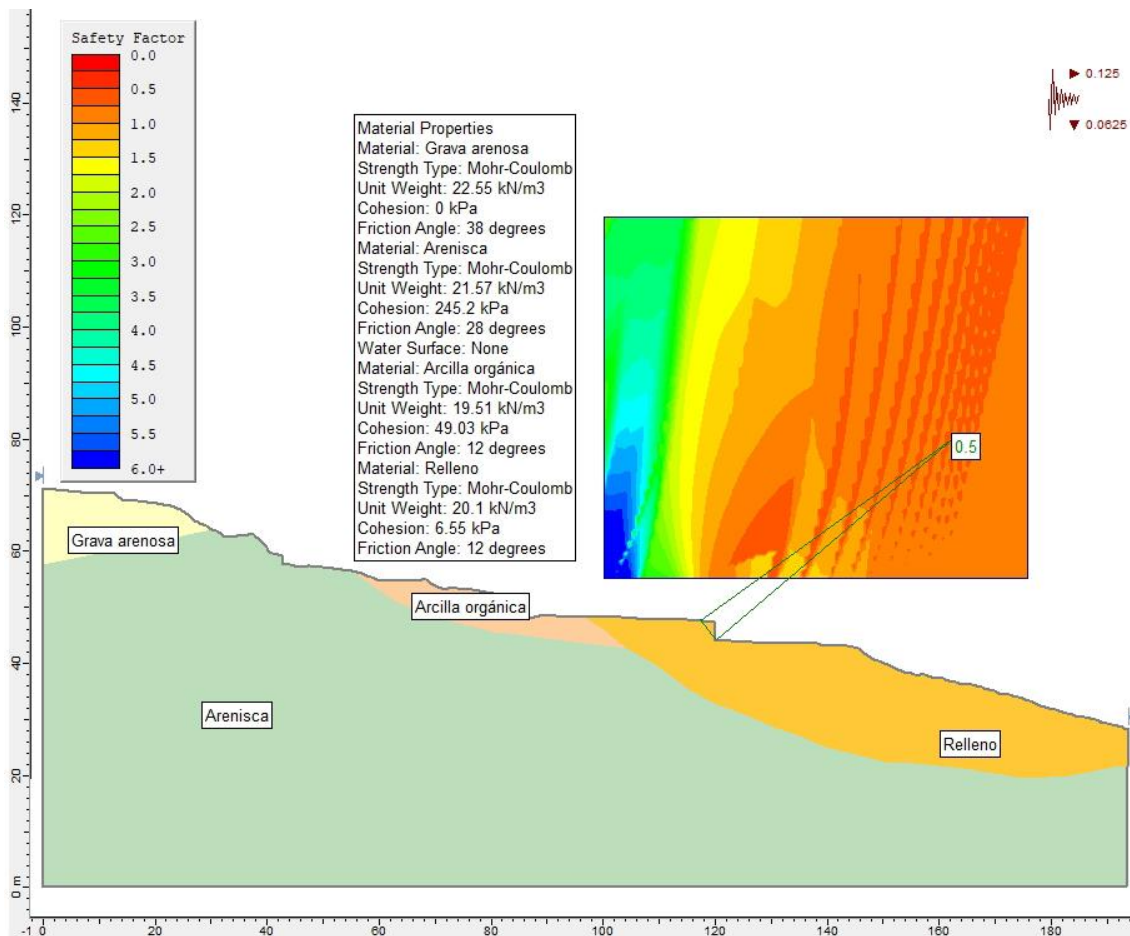


Figura 5-46 F.S. de la ladera en condiciones normales de humedad con aceleración sísmica  $K_h = 0,125$  y  $K_v = 0,0625$  (F.S. = 0,5).

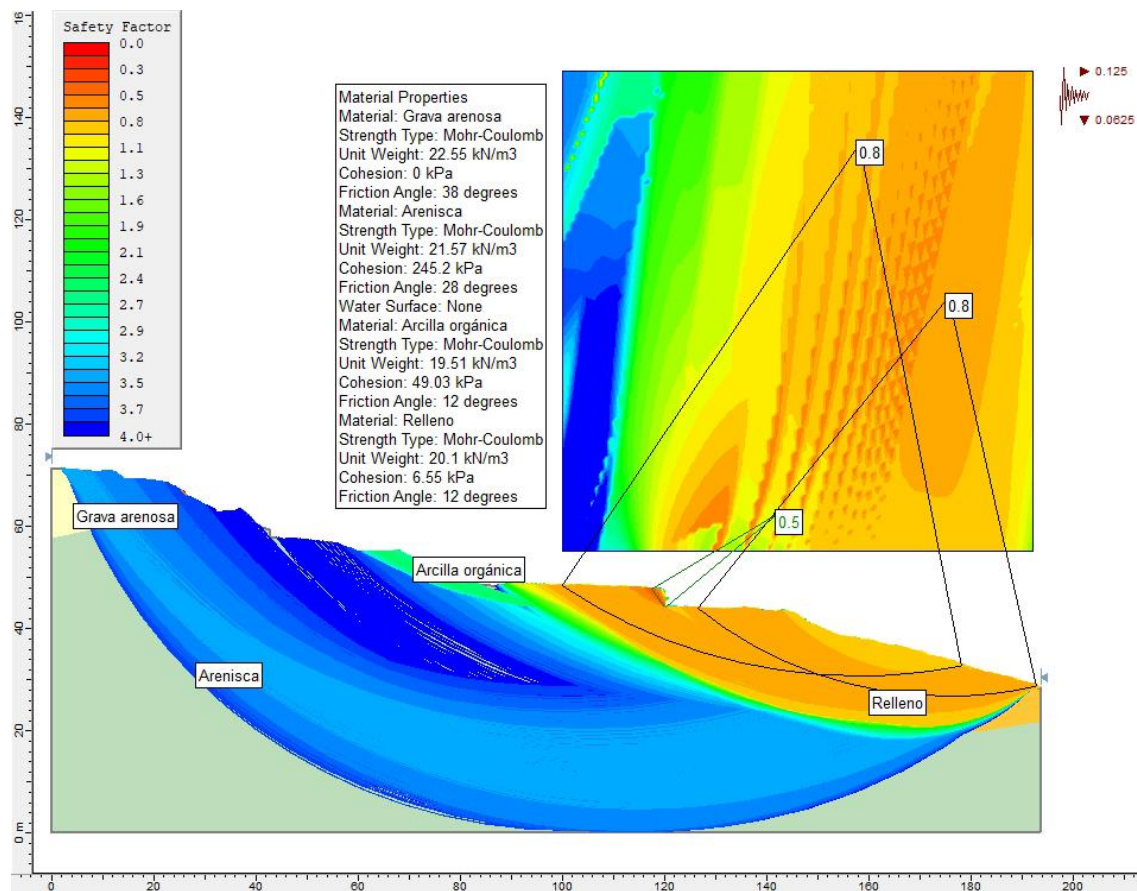


Figura 5-47 Superficies de falla de la ladera en condiciones normales de humedad con aceleración sísmica  $K_h = 0,125$  y  $K_v = 0,0625$ .

## Capítulo 6

### Conclusiones y recomendaciones

- Para iniciar la investigación en la zona se delimitó el área de estudio, tomando como primer paso la zona más afectada, Cerca de la zona analizada, al norte, existen más casas afectadas por el deslizamiento, pero en la zona intermedia hay viviendas que no presentan daños estructurales importantes, para investigaciones posteriores se recomienda realizar el estudio incluyendo a las dos zonas.
- En base a los perfiles de nube de puntos, el deslizamiento se encuentra en la actualidad activo, con movimientos diferenciales alrededor de 3 cm/mes en algunos sectores de la ladera de estudio. En base a imágenes satelitales, ortofotos y escaneos con TLS, las edificaciones dentro de la zona se han deslizado alrededor de 3 metros desde que empezó el deslizamiento, la zona más afectada es la parte media ubicada en el perfil B-B'.



- Los resultados del análisis de estabilidad con Slide confirman que la ladera es insegura e inestable en los dos escenarios analizados (terreno en condiciones normales de humedad  $F_s=0.6$  y terreno en condiciones normales de humedad con sismo  $F_s=0.4$ ).
- Las muestras de suelo se obtuvieron de afloramientos existentes en la zona por lo que las características mecánicas del suelo podrían mejorar a mayor profundidad que forma parte de la Formación Santa Rosa. Las pruebas de laboratorio realizadas en esta tesis concuerdan con estudios preexistentes de que existe un material resistente.
- La presencia de arcillas expansivas en la zona es evidente, estudios anteriores realizados por el Municipio de Cuenca afirman esta situación en la zona de estudio al igual que las pruebas de laboratorio realizadas con los materiales presentes en la zona, además existe una vivienda de dos pisos habitada que no presenta daños significantes en su estructura esto se debe a que fue reconstruida con un estudio de suelo y un diseño de cimentación profunda acorde a los requerimientos técnicos para contrarrestar las arcillas expansivas, y se evidencia claramente ya que las casas colindantes si están afectadas (ver anexo 14).
- En las fotografías aéreas de los años 1863, 1977 y 1989 no se evidencia ningún vestigio de que haya existido un deslizamiento en dichos años, ni una quebrada de 15 m de profundidad que tuviera que ser rellenada tal y como explica el informe de Tecnosuelos (2006). Esta supuesta quebrada de 15 m tampoco se identifica ni en la tomografía sísmica llevada a cabo en esta tesis ni en el mapa topográfico de 1980 recopilado del Municipio.
- Los métodos de levantamiento con TLS combinados con información geográfica ofrecen una gran cantidad de información para el estudio de deslizamientos. A pesar de que los resultados obtenidos con el TLS son satisfactorios, aún existe un amplio camino por recorrer para utilizar al máximo la capacidad de esta nueva metodología.
- Para estudios posteriores se recomienda realizar: tomografías eléctricas a lo largo del deslizamiento y fusionar con los resultados del LTS, estudios



geotécnicos para un mejor conocimiento de la estratigrafía, estudios específicos para encontrar las propiedades mecánicas del suelo con la presencia de agua.

- A lo largo de la zona de estudio en los diferentes perfiles analizados no se ha detectado el pie del deslizamiento simplemente se identificó el escarpe principal y parte de los flancos derecho e izquierdo.
- Para mejorar el análisis geofísico es recomendable complementar el análisis multicanal para valores Vs y contrastar con valores Vp.

## Capítulo 7

### Referencias bibliográficas

- Abellán, A., Calvet, J., Vilaplana, J. M., & Blanchard, J. (2010). Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. *Geomorphology*, 119, 162–172.
- Aguay, H. N., & Dranichnikov, T. (2015). Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional. *Universidad Politécnica Salesiana*.
- Arco, J. (2010). *Monitorización de movimientos de ladera mediante láser escáner*.
- Armas, R., & Horta, E. (1987). Presas de Tierra. *Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, La Habana*.
- Basabe, P., Neumann, A., Almeida, E., Herrera, B., García, E., O. (1998). *Prevención de desastres naturales en la Cuenca del Paute—Informe final: Proyecto Precupa*.
- Basabe, P., Neumann, A., Almeida, E., Herrera, B., García, E., & Ontaneda, P. (1998). *Prevención de desastres naturales en la Cuenca del Paute—Informe final: Proyecto Precupa*. Cuenca, Ecuador.
- Bernardini, F., & Rushmeier, H. (2002). The 3D model acquisition pipeline. *Computer Graphics Forum*, 21, 149–172.
- Bertacchini, E., Capitani, A., Capra, A., Castagnetti, C., Corsini, A., Dubbini, M., & Ronchetti, F. (2009). Integrated surveying system for landslide monitoring, Valoria landslide (Appennines of Modena, Italy). In *FIG Working Week 2009-*





*Surveyors Key Role in Accelerated Development* (pp. 1–11).

- Blong, R. J. (1973). Relationships between morphometric attributes of landslides. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 18, 66–67.
- Brunsden, D. (1973). The application of system theory to the study of mass movement. *Geologia Applicata Idrogeologia*, 8, 185–207.
- Brunsden, D. (1979). Mass movements. *Process in Geomorphology*, 130–186.
- Calcaterra, S., Cesi, C., Di Maio, C., Gambino, P., Merli, K., Vallario, M., & Vassallo, R. (2012). Surface displacements of two landslides evaluated by GPS and inclinometer systems: a case study in Southern Apennines, Italy. *Natural Hazards*, 61, 257–266.
- Coates, D. R. (1977). Landslide perspectives. *Reviews in Engineering Geology*, 3, 1–28.
- Coe, J. A., Ellis, W. L., Godt, J. W., Savage, W. Z., Savage, J. E., Michael, J., ... Debray, S. (2003). Seasonal movement of the Slumgullion landslide determined from Global Positioning System surveys and field instrumentation, July 1998--March 2002. *Engineering Geology*, 68, 67–101.
- Correia, N. (2015). Obtención del Perfil de Velocidad de Onda de Corte Mediante Método MASW y Comparación con Ensayo Tipo DownHole en Estaciones Sismológicas de Zona Central. *Universidad de Chile*.
- Crozier, M. J. (1973). Techniques for the morphometric analysis of landslides. *Zeitschrift Fur Géomorphologie*, 17, 78–101.
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 43, 27–29.
- Das, B. M. (1983). *Fundamentals of soil dynamics*.
- Delacourt, C., Allemand, P., Berthier, E., Raucoules, D., Casso, B., Grandjean, P., ... Varel, E. (2007). Remote-sensing techniques for analysing landslide kinematics: a review. *Bulletin de La Société Géologique de France*, 178.
- Devincenzi, M., & Frank, N. (2004). Ensayos Geotécnicos In Situ. *IGEOTEST*.
- Erskine, C. F. (1973). Landslides in the Vicinity of the Fort Randall Reservoir, South



- Dakota. In *Geological Survey professional paper* (Vol. 675). US Government Printing Office.
- Faro. (2011). FARO® Laser Scanner Focus3D Manual. Retrieved from <https://www.faro.com>
- FENEFEDIT. (2014). Ecuador - Un destino incluyente. Retrieved from <http://turismoaccesible.ec>
- Fernández, T. (2001). Cartografía, análisis y modelado de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en macizos rocosos mediante SIG: Aplicación a diversos sectores del Sur de la provincia de Granada. *Unpublished PhD Thesis. Department of Civil Engineering. University of Granada, Spain.*
- Gary, M., McAfee, R., & Wolf, C. L. (1972). *Glossary of geology*. American Geological Institute.
- Gestion de Riegos. (2015). *Informe Tecnico del estado actual del la urbanizacino: "Trigales Altos."*
- Gili, J. A., Corominas, J., & Rius, J. (2000). Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. *Engineering Geology*, 55, 167–192.
- Hutchinson, J. (1988). Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology, Landslides. In *Proceedings of the fifth international symposium on landslides*. (pp. 3–35).
- Hutchinson, J. N. (1968). Mass movement. In *Geomorphology* (pp. 688–696). Springer.
- López Avalos, J. M., Mejía Carrillos, J. A., & Vega, N. D. (2008). Aplicación del método de refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P. *Universidad de El Salvador*.
- Malet, J.-P., Maquaire, O., & Calais, E. (2002). The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology*, 43, 33–54.
- MIDUVI, C. (2015). *Norma ecuatoriana de la construcción: riesgo sísmico diseño*



*sismo resistente NEC-SE-DS.*

- Moss, J. L. (2000). Using the Global Positioning System to monitor dynamic ground deformation networks on potentially active landslides. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2, 24–32.
- Muelas Rodriguez, A. (2010). Caracterizaci3n de suelos. In *Manual de mecánica del suelo y cimentaciones*.
- Palenzuela, J. A., Irigaray, C., Jiménez-Perálvarez, J. D., & Chac3n, J. (2013). Application of terrestrial laser scanner to the assessment of the evolution of diachronic landslides. In *Landslide science and practice* (pp. 517–523).
- Pourrut, P., G3mez, G., Bermeo, A., Segovia, Á., & Segovia, A. (1995). *Factores condicionantes de los reg3menes climáticos e hidrol3gicos. El Agua en el Ecuador: clima, precipitaciones, escorrentia*.
- Rizzo, V. (2002). GPS monitoring and new data on slope movements in the Maratea Valley (Potenza, Basilicata). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27, 1535–1544.
- Rucker, M. L. (2003). Applying the refraction microtremor (ReMi) shear wave technique to geotechnical characterization. In *Proc. In. Conf. of the third international conference on the application of geophysical methodologies and NDT to transportation and infrastructure (Florida)* (pp. 8–12).
- Sharpe, C. F. (1938). *Landslides and related phenomena*.
- Singaucho Armas, J. C. (2009). *Mapa de máximas intensidades sísmicas del Ecuador criterios estructurales para mejorar la estimaci3n de intensidades*. UITO/EPN/2009.
- Skempton, A. W. (1953). Soil mechanics in relation to geology. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, 29, 33–62.
- Skempton, A. W., & Hutchinson, J. N. (1969). Stability of natural slopes and embankment foundations. In *Soil Mech & Fdn Eng Conf Proc/Mexico* (pp. 291–340).
- Suarez Diaz, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*.



Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos.

- Tagliavini, F., Mantovani, M., Marcato, G., Pasuto, A., & Silvano, S. (2007). Validation of landslide hazard assessment by means of GPS monitoring technique? a case study in the Dolomites (Eastern Alps, Italy). *Natural Hazards and Earth System Science*, 7, 185–193.
- Tecnosuelos. (2006). *Estudio, perforaciones y resistividad electrica en la ciudadela Los Trigales Altos y zonas aledañas*.
- Terzaghi, K. (1950). *Mechanism of landslides*. Harvard University, Department of Engineering.
- Varnes, D. J. (1958). Landslides types and processes. *Landslides and Engineering Practice*, 24, 20–47.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special Report*, 176, 11–33.
- Ward, W. H. (1945). The stability of natural slopes. *The Geographical Journal*, 105, 170–191.
- Zaruba, Q., & Menci, V. (1969). *Landslides and their control*.

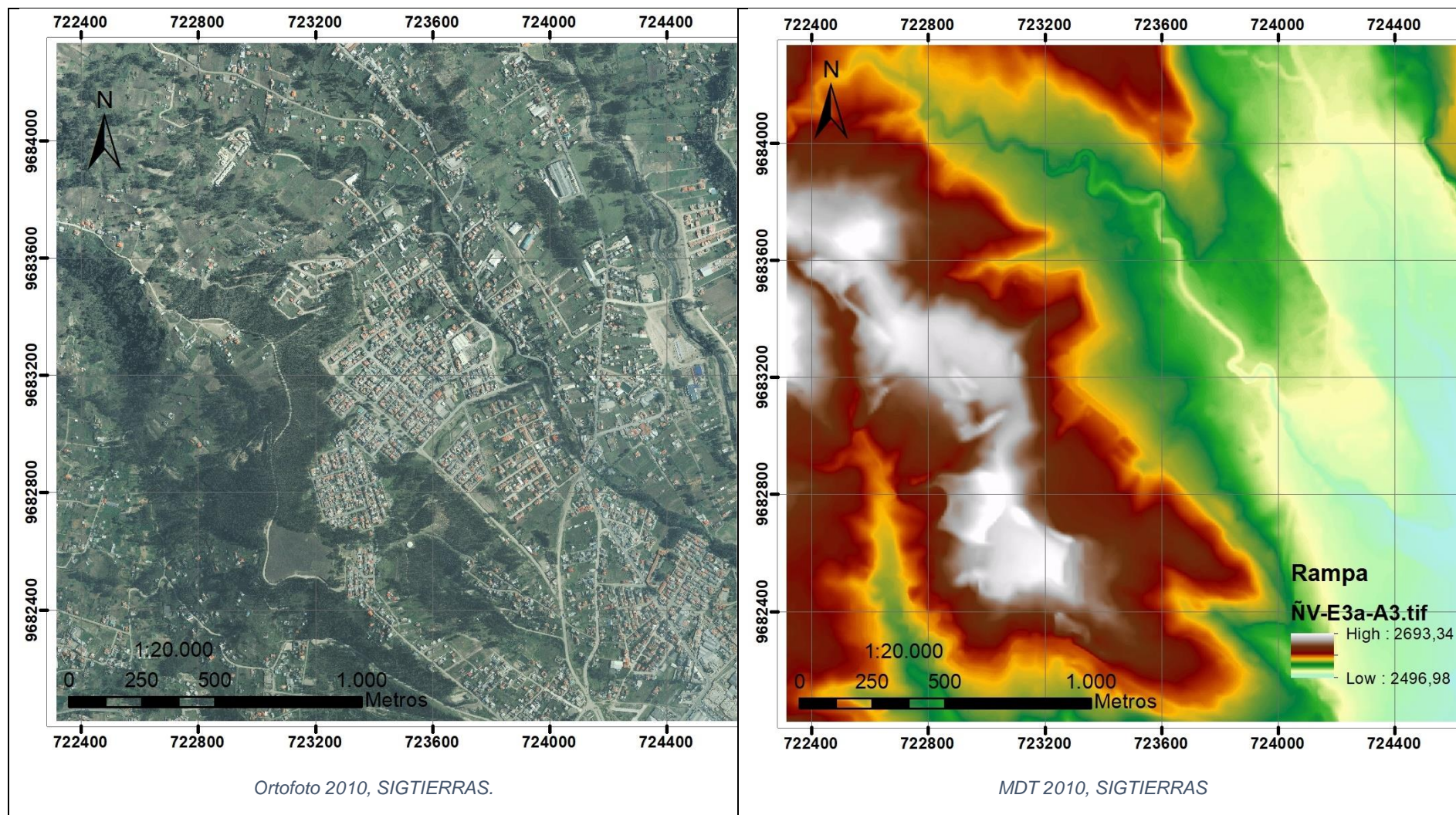


# ANEXOS





### Anexo 1 Ortofoto y MDT (Sigtierras, 2010).





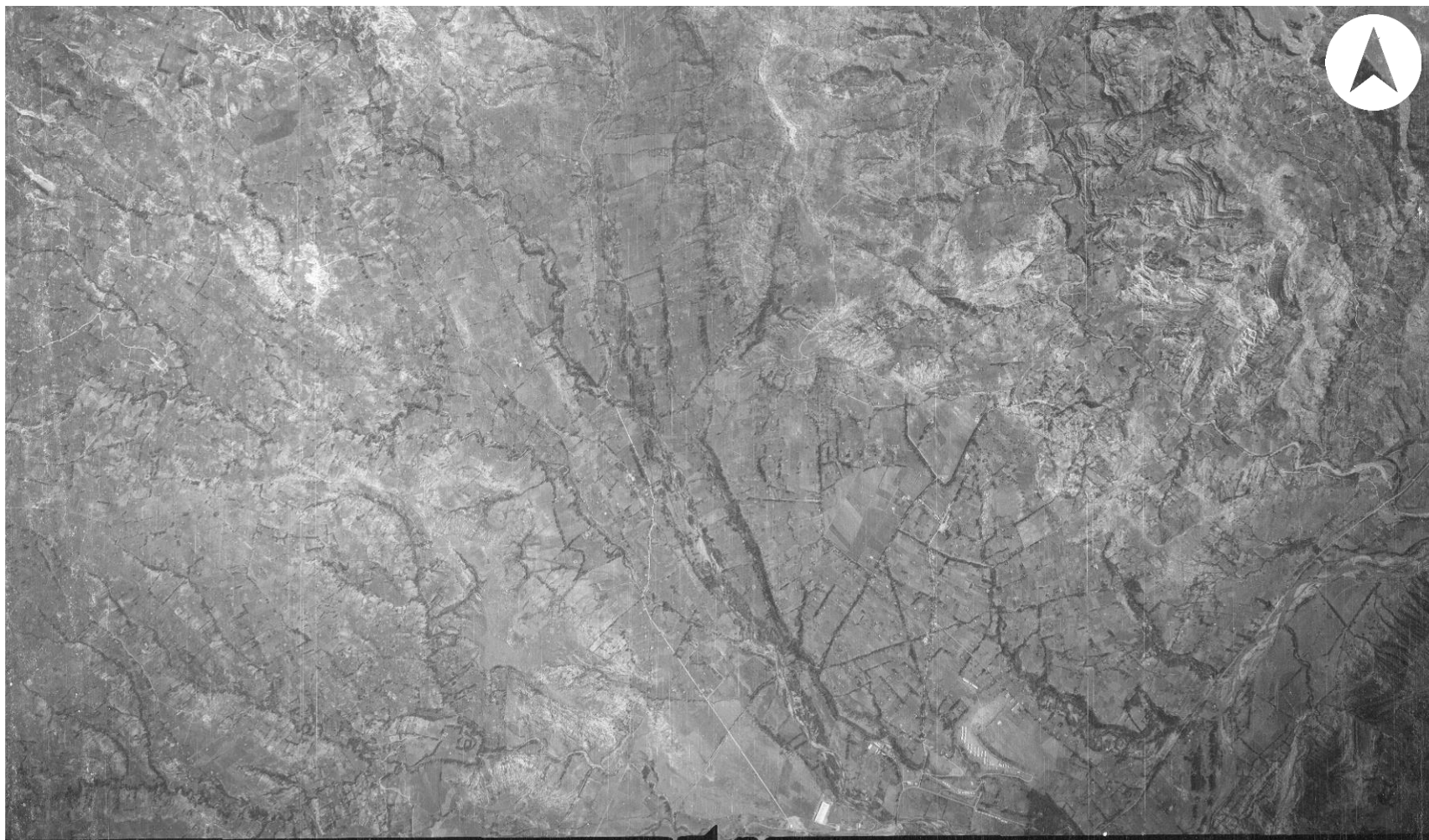


**Anexo 2 Par estereoscópico fotografías aéreas 1963.**



Anexo 2.1 Fotografía izquierda.





Anexo 2.1 Fotografía derecha





### Anexo 3 Par estereoscópico fotografías aéreas 1977.



Anexo 3.1 Fotografía izquierda.





Anexo 3.1 Fotografía derecha





#### Anexo 4 Par estereoscópico fotografías aéreas 1989



Anexo 4.1 Fotografía izquierda.



Anexo 4.1 Fotografía derecha

.



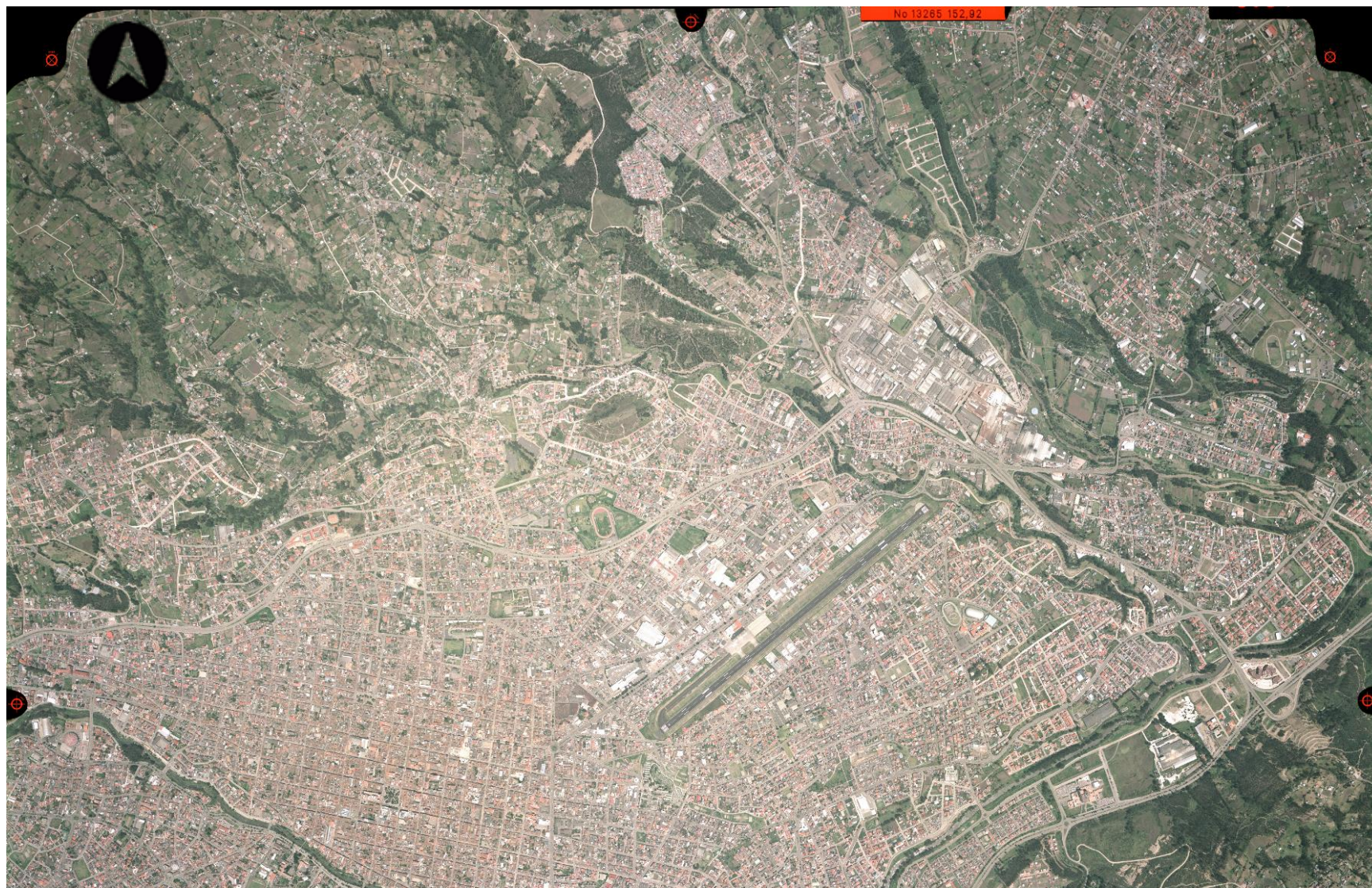


### Anexo 5 Par estereoscópico fotografías aéreas 2008



Anexo 5.1 Fotografía derecha



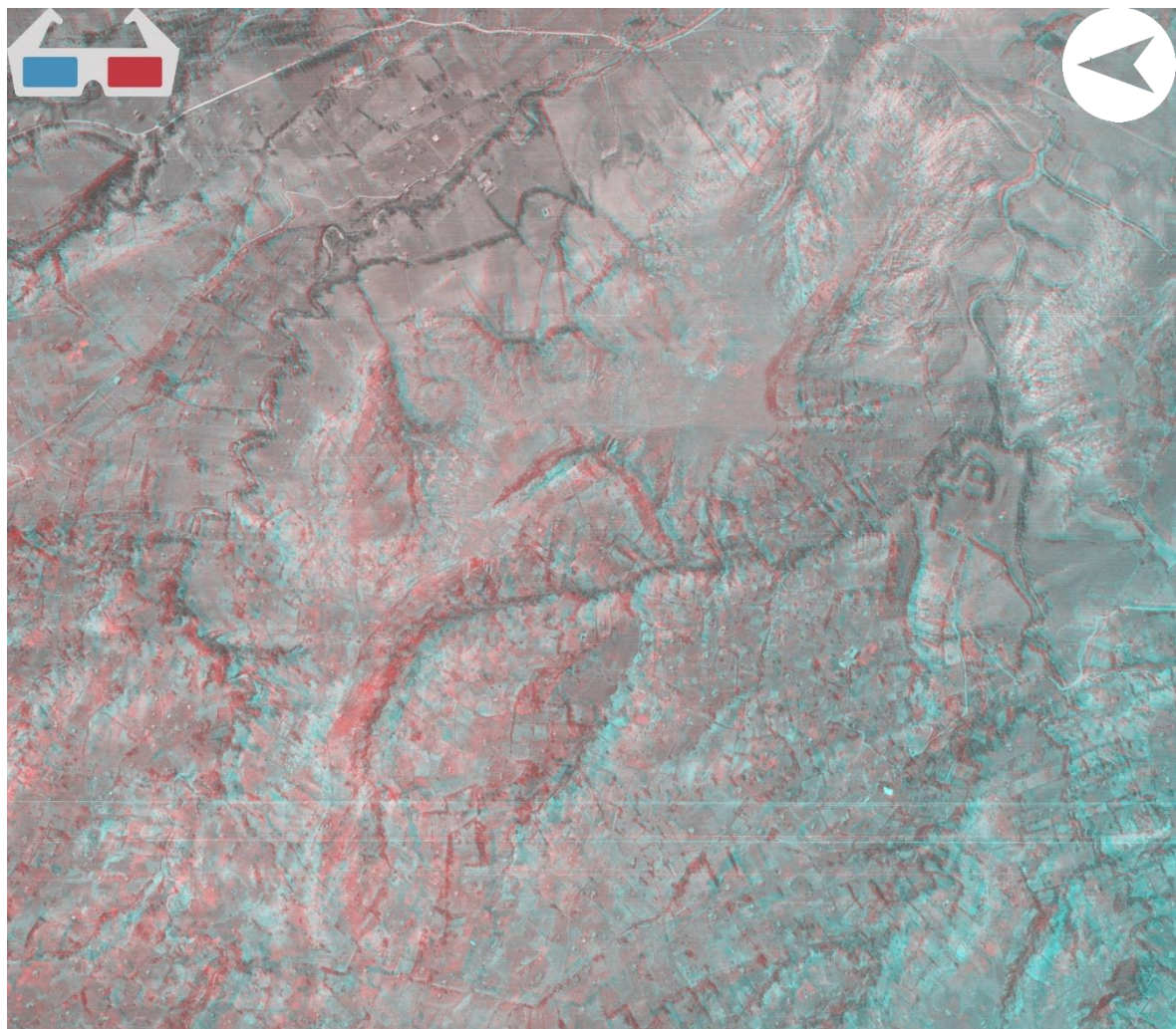


Anexo 2.1 Fotografía izquierda.



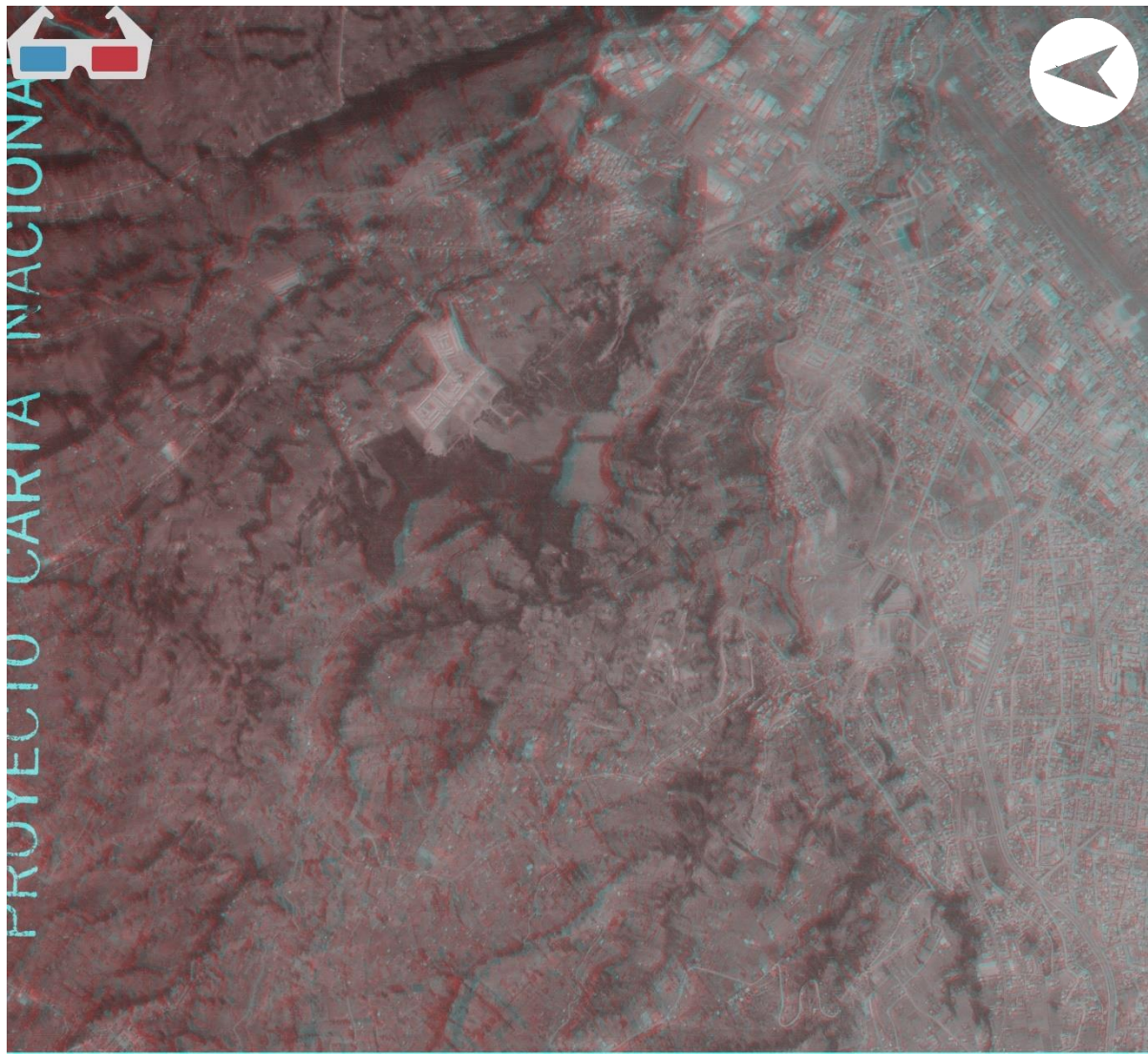


## Anexo 6 Anáglifos creados a partir de pares estereoscópicos.



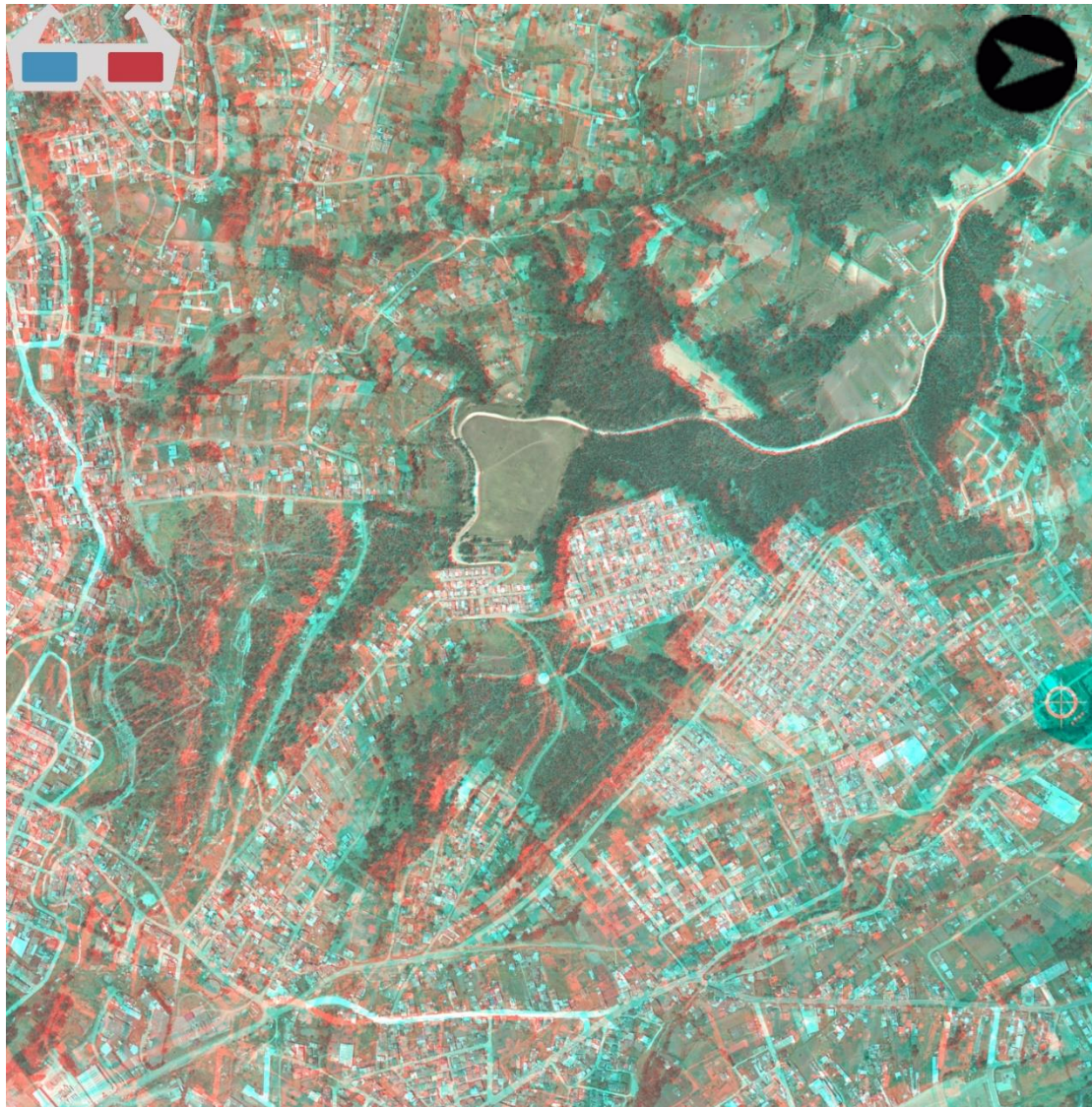
*Anexo 6.1 Anáglifos fotografías aéreas 1963, IMG.*





*Anexo 6.2 Anáglifos fotografías aéreas 1989, IMG.*





*Anexo 6.3 Anáglifos fotografías aéreas 2008, IMG.*

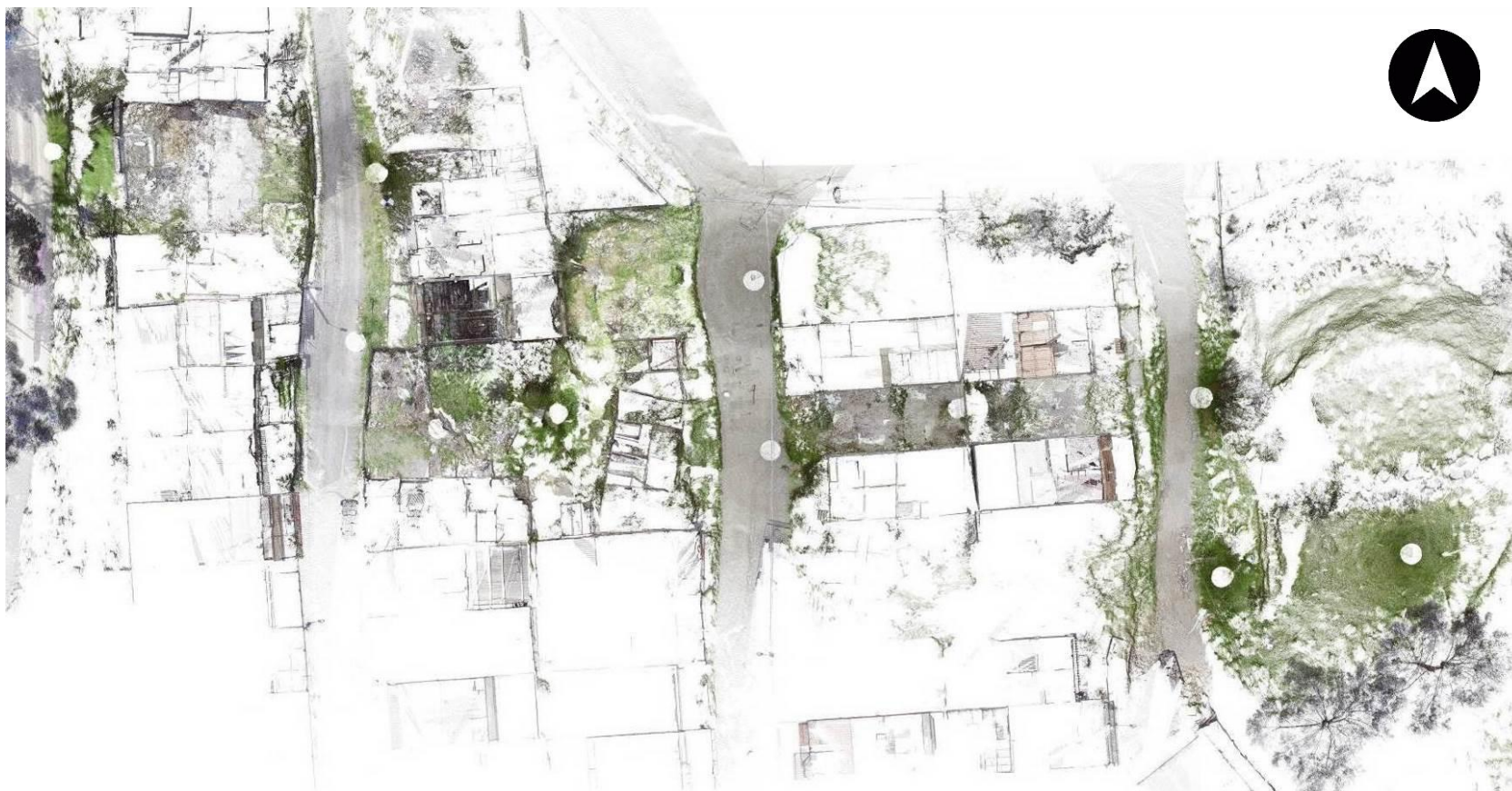




## Anexo 7 Ortofotos generadas a partir de la nube de puntos del TLS.

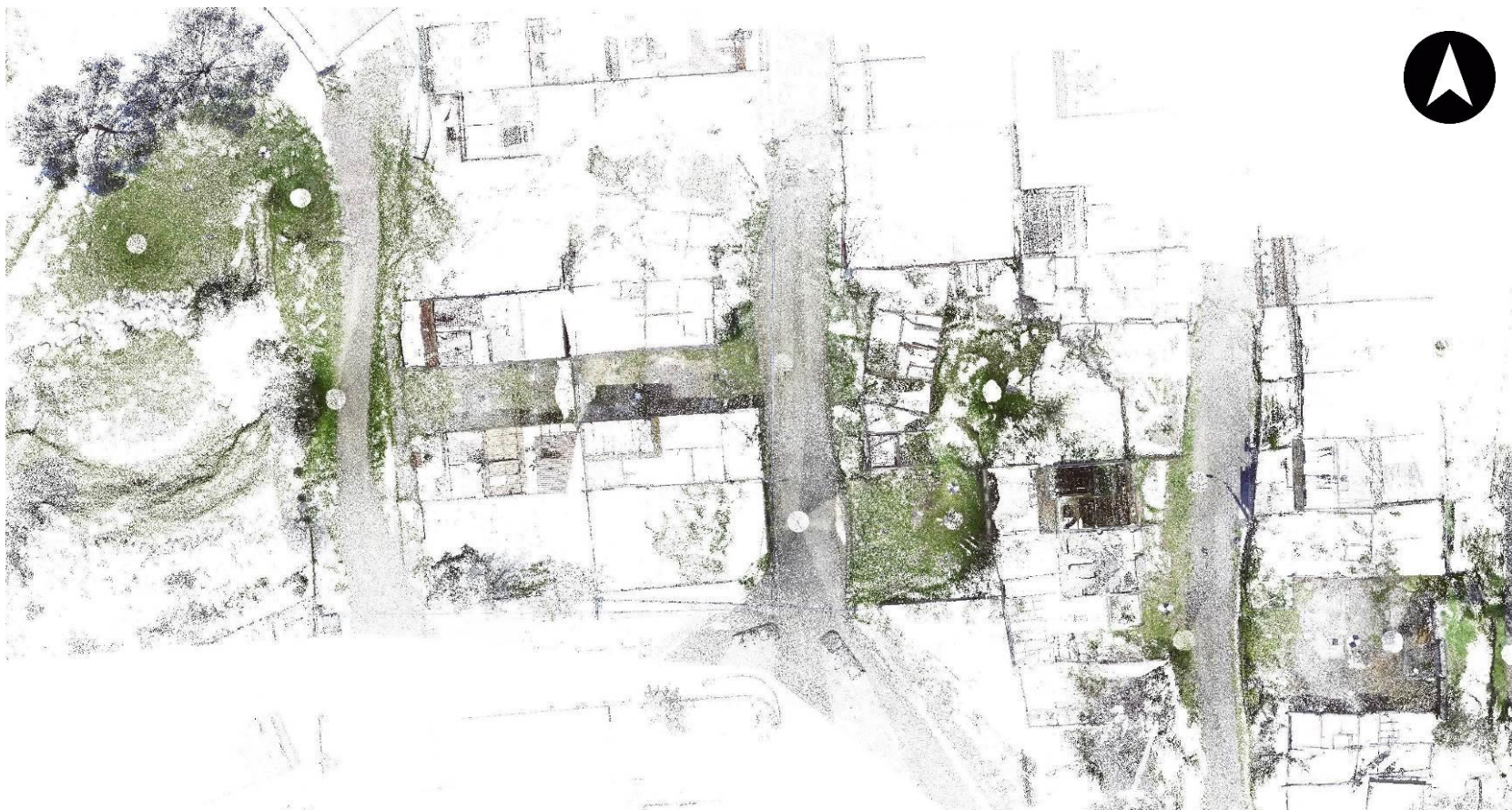


*Anexo 7.1 Ortofoto primer levantamiento 16/12/2016.*



*Anexo 7.2 Ortofoto segundo levantamiento 01/06/2017.*

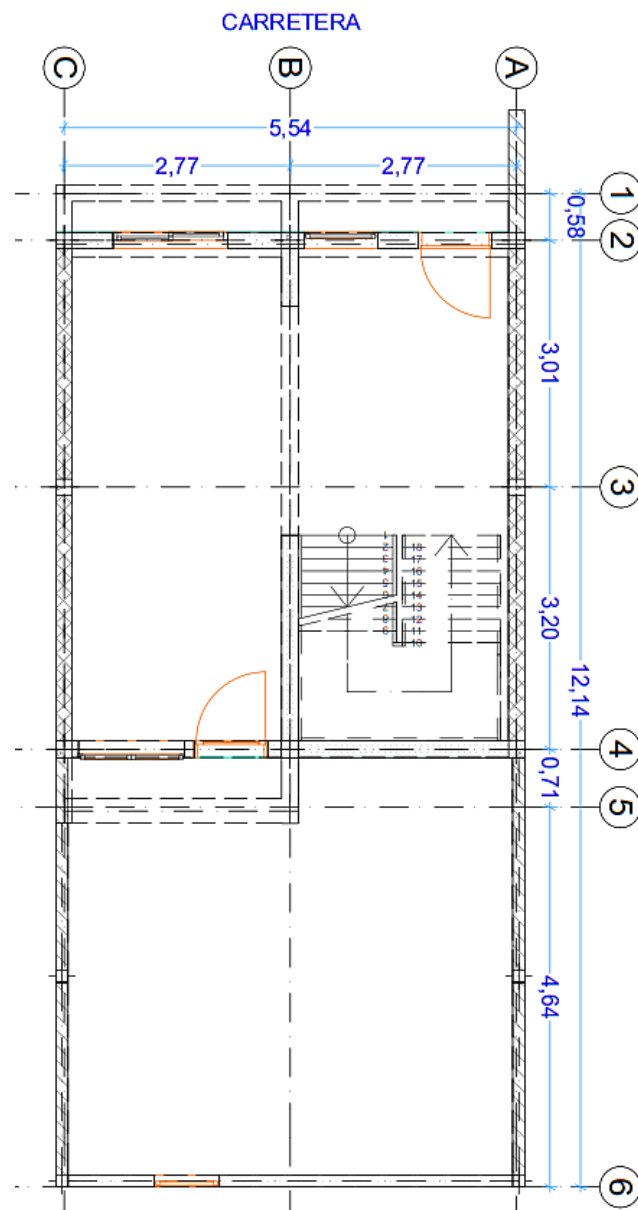




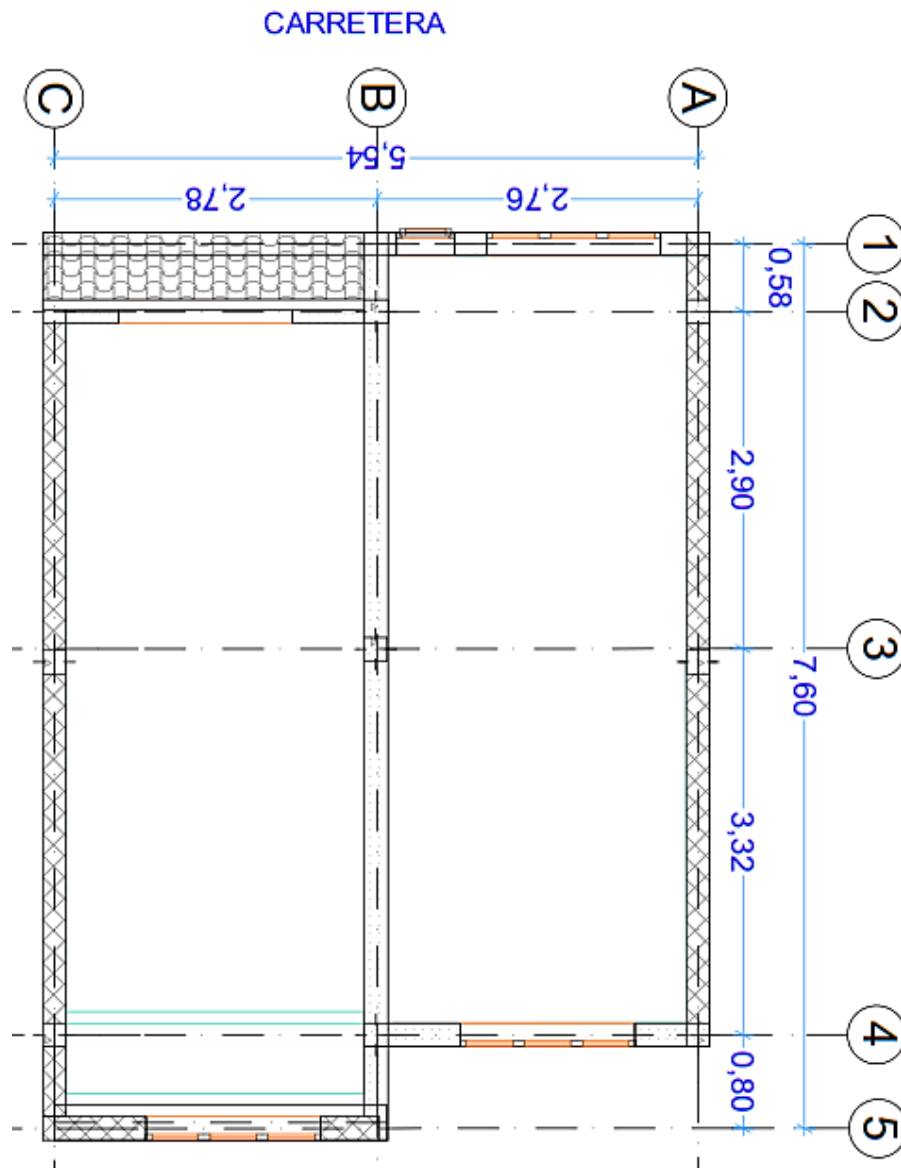
*Anexo 7.3 Ortofoto tercer levantamiento 08/07/17.*



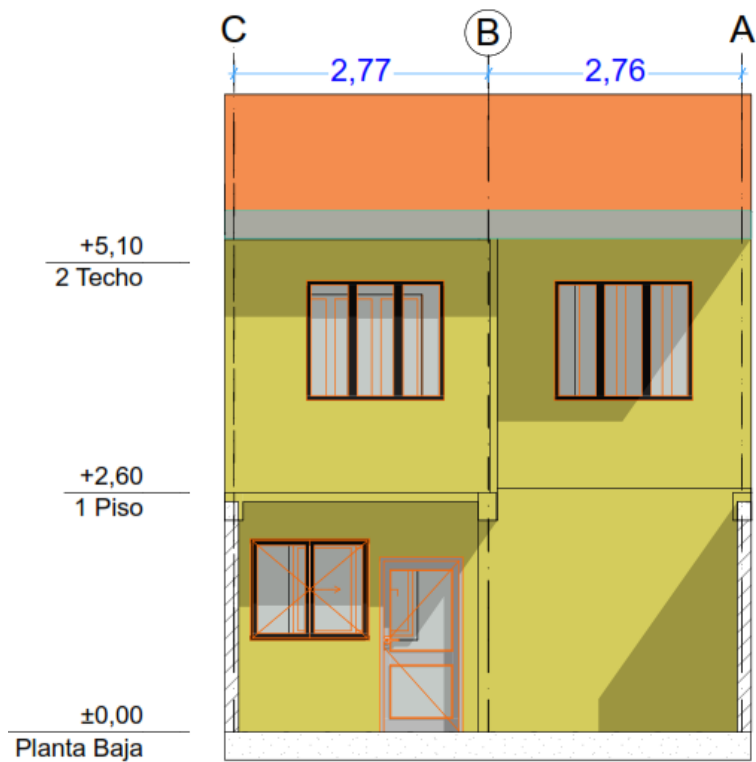
## Anexo 8 Planos Edificación 1.



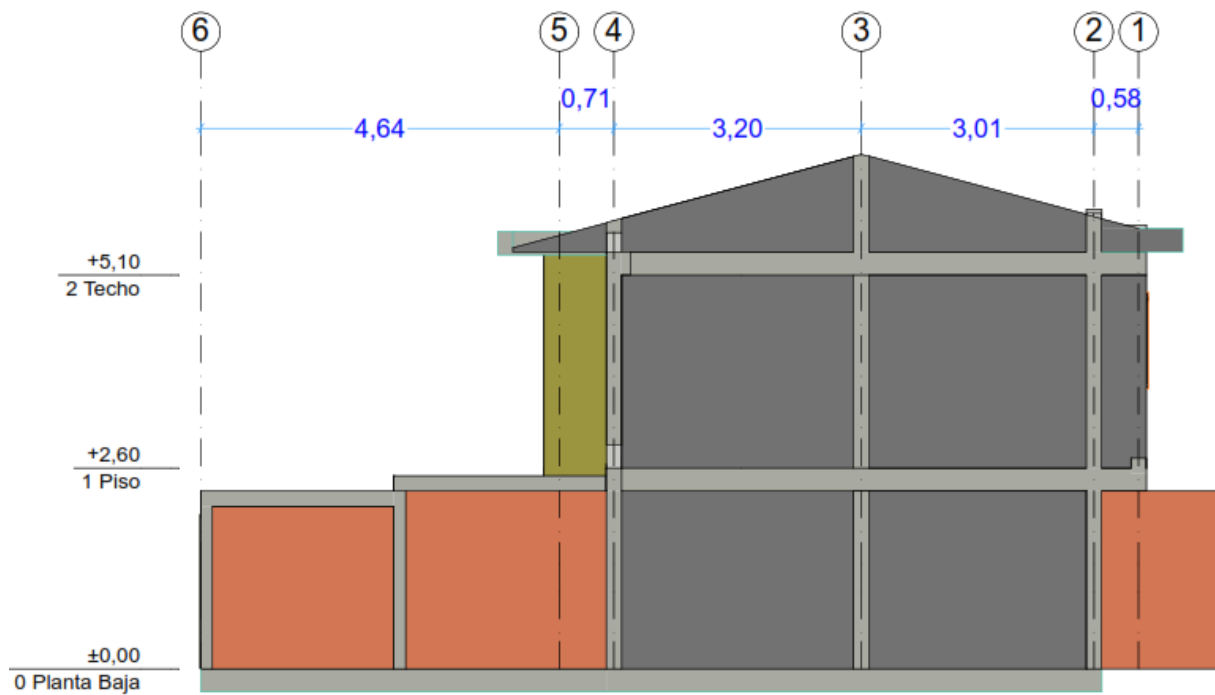
Anexo 8.1 Planta baja edificación 1.



Anexo 8.2 Planta alta edificación 1.

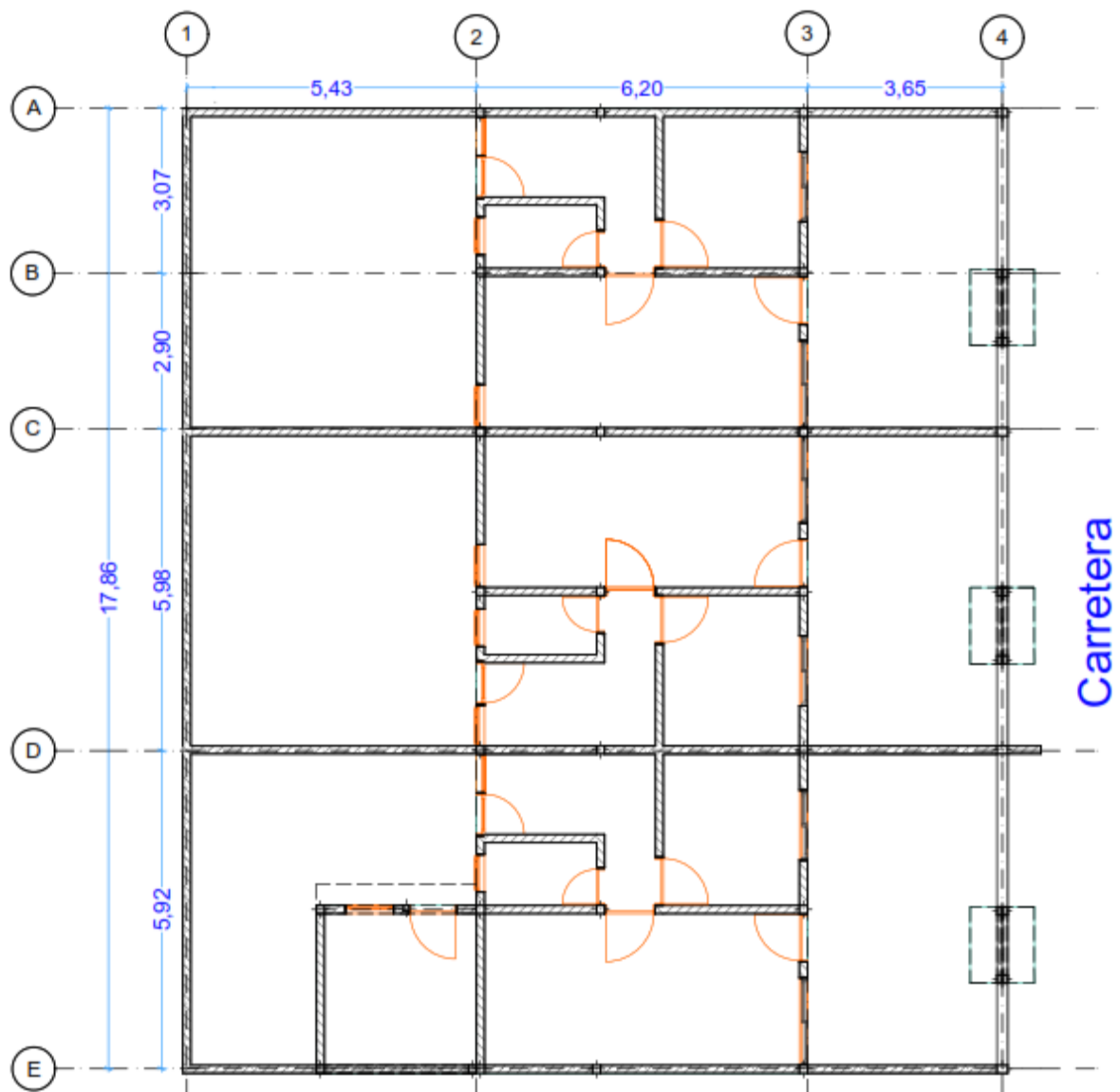


Anexo 8.3 Vista frontal oeste - edificación 1.

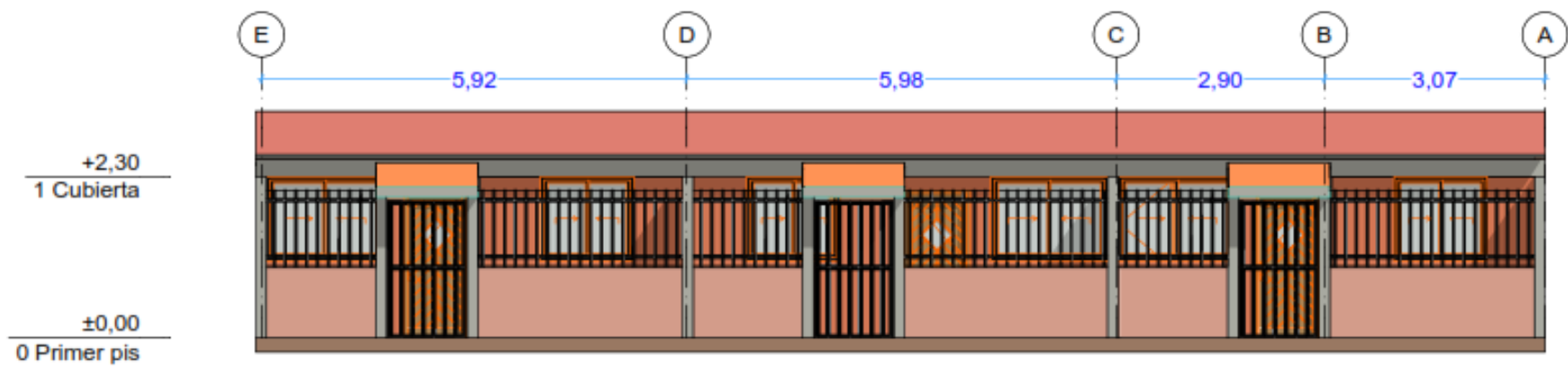


Anexo 8.4 Vista lateral norte - edificación 1.

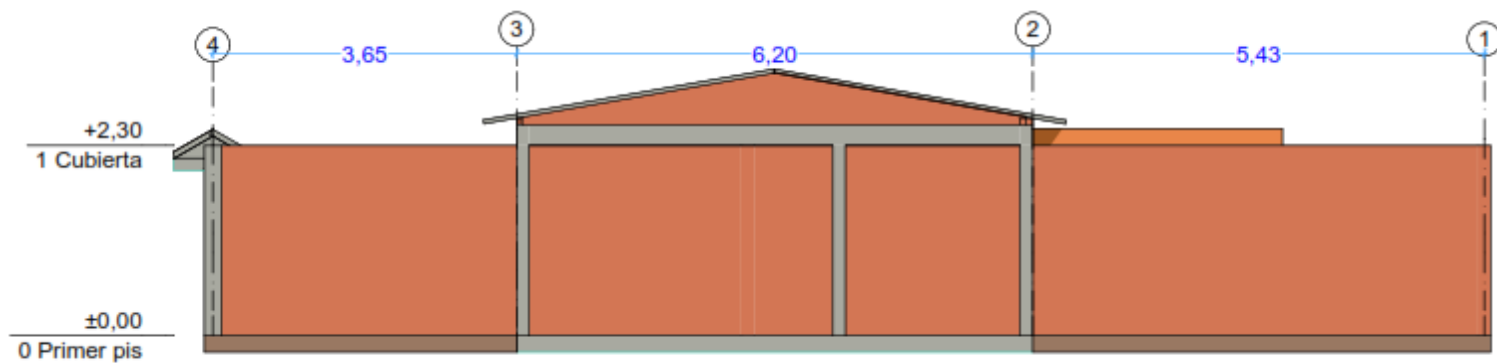
## Anexo 9 Planos Edificación 2.



Anexo 9.1 Planta baja edificación 2.



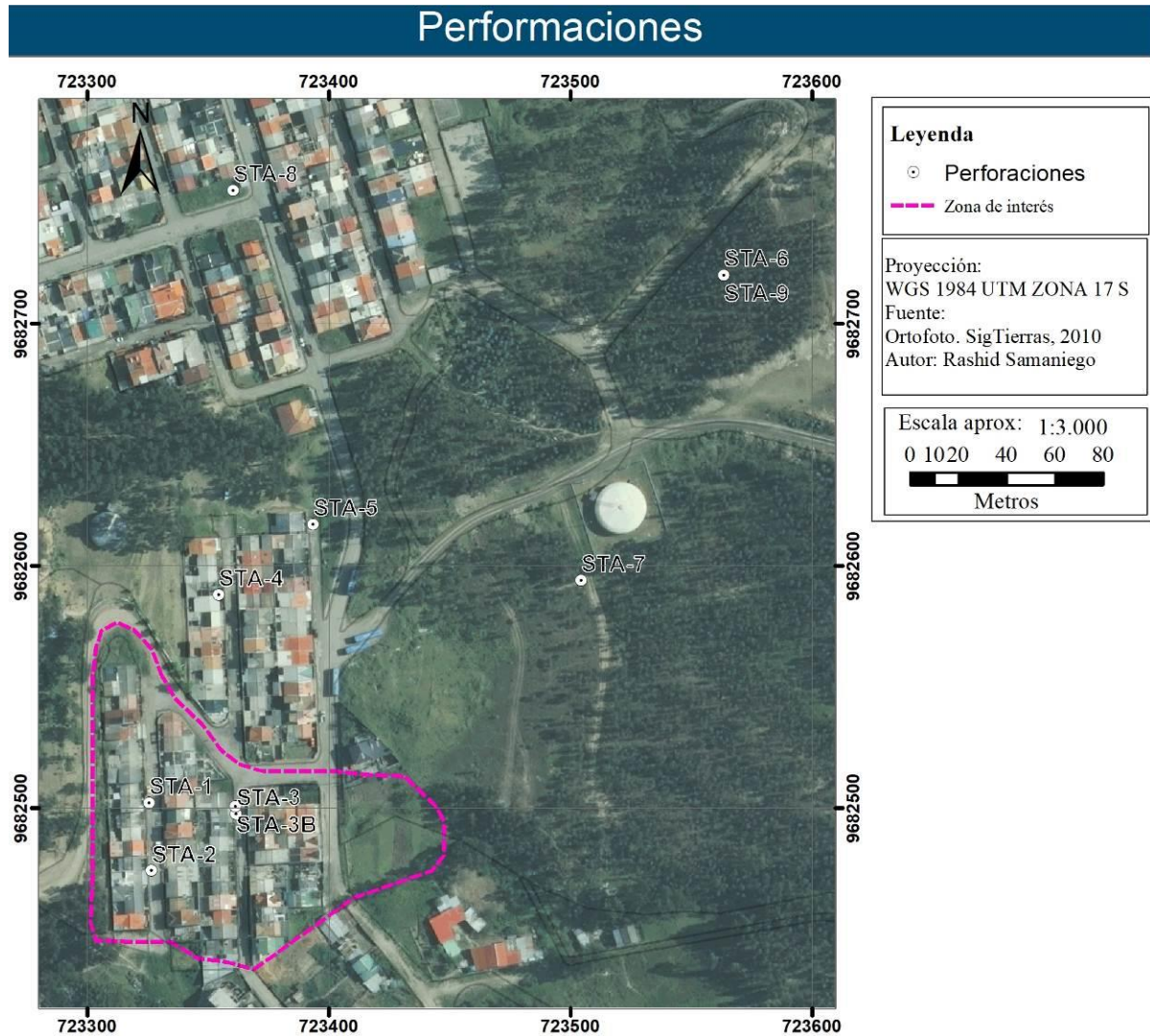
Anexo 9.2 Vista frontal sur - edificación 2.



Anexo 9.3 Vista lateral este – edificación 2.



## Anexo 10 Distribución perforaciones en de la zona de estudio.





PROF (m)	MUESTRA	ENSAYO SPT				DESCRIPCIÓN DE MATERIALES	COMPRESION TRIAXIAL UU			LIMITES DE ATTERBERG			GRANULO METRIA			SUCS	Litogénesis
		0-15	15-30	30-45	"N" SPT		C (kg/m²)	PHI (°)	Y g/cm3	W (%)	LL (%)	LP (%)	G	S	F		
0,50	S1	2	2	3	5	Grava arenosa con arcilla café, con guijarros de 1 a 4 cm de diámetro. Relación arena/arcilla/grava = 30/10/60. RELLENO GRANULAR	0,22				73	37	3	2	95	OH	Subrasante
1,00						Sh1											
1,50	S2	3	5	6	11	Arcilla orgánica negra, plástica, húmeda, pegajosa, con gravas dispersas a la base.	0,5				45	24	11	26	63	CL	Suelos edafólogos arcillosos, blandos y expansivos
2,00						S3											
2,50	S3	3	3	4	7	Arcilla abigarrada café y verde con gravas dispersas, cantos de 2 a 3 cm de diámetro.	1,1										
3,00						S4											
3,50	S4	4	7	9	16	Arcilla orgánica negra, plástica, húmeda, pegajosa, con gravas dispersas a la base. Agua del nivel freático se fuga por la arena inferior. DEPOSITO COLUVIAL											
4,00						S5											
4,50	S5	11	25	R	R	Arena gruesa suelta, café amarillenta oxidada, con gravas dispersas muy alteradas. Arcilla arenosa plástica de color crema verdoso a la base. SUELO RESIDUAL											
5,00						S6											
5,50	S6	25	R	R	R												
6,00						S7											
6,50	S7	15	25	R	R	Arenisca gruesa, con cuarzo - feldespato y líticos, color verdoso claro, argilizada y manchada por oxidaciones ocre y rojas. Estructura masiva y compacta, ligeramente húmeda ( estrato duro de la formación Sta. Rosa). ROCA											FORMACIÓN SANTA ROSA
7,00																	
7,50																	
8,00																	
8,50																	
9,00																	
9,50																	
10,00																	

S = SPT Sh = Shelby

**Anexo 11 Registros del sondeo Sta1 de exploración ejecutados durante el programa de exploraciones de campo. Tecnosuelos (2016).**



PROF (m)	MUESTRA	ENSAYO SPT				DESCRIPCIÓN DE MATERIALES	COMPRESION TRIAXIAL UU			LIMITES DE ATTERBERG			GRANULO METRIA			SUCS	Litogénesis
		0-15	15-30	30-45	"N" SPT		C kg/m <sup>2</sup>	PHI (°)	Y g/cm <sup>3</sup>	W (%)	LL (%)	LP (%)	G	S	F		
10,50						Arenisca fina a media. Rica en feldespato, caolinizada ligeramente, de color gris claro, masiva, compacta, dura, ligeramente húmeda, con diaclasas verticales, manchada por oxidaciones ocre. A la base parcialmente suelta y microconglomeráticos con cantos de lutita roja (estrato duro de la formación Sta. Rosa).  ROCA											
11,00																	
11,50																	
12,00																	
12,50																	
13,00						Arcilla limosa estratificada de color rojo, compacta, ligeramente húmeda (estrato blando de la formación Sta. Rosa)											
13,50																	
14,00	S8	40	R		R	Arenisca lítica gruesa de color gris, con niveles microconglomeráticos. Compacta. Débilmente cementada, dura, ligeramente húmeda. Con niveles de arena fina argilizada ( estrato duro de la formación Sta. Rosa)					52	37		38	62	CH	FORMACIÓN SANTA ROSA
14,50																	
15,00																	
15,50																	
16,00																	
16,50																	
17,00																	
17,50																	
18,00																	
18,50																	
19,00						Arcilla limo arenosa caolinífera de color crema, manchada por oxidación ocre y rojas. Compacta, homogénea, ligeramente húmeda con cristales de feldespato dispersos (estrato blando de la formación Sta. Rosa).											
19,50																	
20,00																	

S = SPT Sh = Shelby

**Anexo 11 Registros del sondeo Sta1 de exploración ejecutados durante el programa de exploraciones de campo. Tecnosuelos (2016).**



PROF (m)	MUESTRA	ENSAYO SPT				DESCRIPCIÓN DE MATERIALES	COMPRESION TRIAXIAL UU			LIMITES DE ATTERBERG			GRANULO METRIA			SUCS	Litogénesis
		0-15	15-30	30-45	"N" SPT		C (kg/m2)	PHI (°)	Y g/cm <sup>3</sup>	W (%)	LL (%)	LP (%)	G	S	F		
0,25						Grava arenosa con arcilla y manchado por oxidaciones ocre.					32	22	41	42	18	SC	Relleno
0,50						MEJORAMIENTO VIAL											
0,75	S1	6	4	3	7	Arcilla negra orgánica con gravas dispersas.											
1,00						HORIZONTE EDÁFICO											
1,25	Sh1					Arcilla de color crema verdoso, compacta homogénea, húmeda, plástica, con niveles manchados por oxidaciones ocre. Localmente arenosa											
1,50																	
1,75	Sh2																
2,00																	
2,25	S2	3	4	5	10												
2,50																	
2,75	Sh3																
3,00																	
3,25	S3	3	5	6	11												
3,50																	
3,75	Sh4					MATERIAL DE RELLENO											
4,00						Arcilla gravosa marrón oscuro con material orgánico, con gravilla y guijarros duros dispersos.											
4,25	S4	3	5	7	12	Muy plástica, húmeda, blanda. Parcialmente arenosa y oxidada. La gravilla llega a componer hasta un 15% del depósito.					51	25	9	26	63	CH	
4,50						MATERIAL DE RELLENO											
4,75																	
5,00																	

S = SPT

Sh = Shelby

### Anexo 12 Registros del sondeo Sta3 de exploración ejecutados durante el programa de exploraciones de campo. Tecnosuelos (2016).





PROF (m)	MUESTRA	ENSAYO SPT				DESCRIPCIÓN DE MATERIALES	COMPRESION TRIAXIAL UU			LIMITES DE ATTERBERG			GRANULO METRIA			SUCS	Litogénesis
		0-15	15-30	30-45	"N" SPT		C	PHI	Y	W	LL	LP	G	S	F		
							kg/m <sup>2</sup>	°	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%					
5,25						Arcilla arenosa color café oscuro, con guijarros duros (<4 cm) y clastos de arcilla verde, manchada con oxidaciones ocre y negras de hierro y manganeso. La gravilla llega a componer hasta un 15% del depósito. Húmeda, plástica muy blanda.											
5,50																	
5,75																	
6,00																	
6,25	S5	3	4	5	9												
6,50											56	25	4	31	66	MH	
6,75																	
7,00																	
7,25																	
7,50																	
7,75						MATERIAL DE RELLENO											
8,00																	
8,25						FIN DEL SONDEO											
8,50																	
8,75																	
9,00																	
9,25																	
9,50																	
9,75																	
10,00																	

S = SPT

Sh = Shelby

**Anexo 12 Registros del sondeo Sta3 de exploración ejecutados durante el programa de exploraciones de campo. Tecnosuelos (2016).**



PROF (m)	MUESTRA	ENSAYO SPT				DESCRIPCIÓN DE MATERIALES	COMPRESION TRIAXIAL UU			LIMITES DE ATTERBERG			GRANULO METRIA			SUCS	Litogénesis
		0-15	15-30	30-45	"N" SPT		C	PHI	Y	W	LL	LP	G	S	F		
0,25						Grava arenosa con arcilla mancada por oxidaciones ocreas.											Relleno vial
0,50																	
0,75						MATERIAL MEJORAMIENTO VIAL.											Relleno de quebrada
1,00						Arcilla negra organica con gravas dispersas. HORIZONTE EDAFICO REMOVILIZADO											
1,25						arcilla arenosa de color rema verdoso compacta, homogénea, húmeda, plástica, con niveles manchados por oxidaciones ocreas.											
1,50																	
1,75																	
2,00																	
2,25																	
2,50																	
2,75																	
3,00																	
3,25																	
3,50																	
3,75						MATERIAL DE RELLENO - ESTE NIVEL PROBABLEMENTE MATERIAL DE PRESTAMO DE LA FORMACIÓN SANA ROSA											
4,00						Arcilla gravosa marrón oscuros con material orgánico, con gravilla y guijarros duros dispersos. Muy plástica, húmeda, blanda. Parcialmente arenosa y oxidada. La gravilla llega a componer hasta un 15% del depósito.											
4,25																	
4,50																	
4,75																	
5,00							MATERIAL DE RELLENO										

S = SPT

Sh = Shelby

### Anexo 13 Registros del sondeo Sta3 B de exploración ejecutados durante el programa de exploraciones de campo. Tecnosuelos (2016).



PROF (m)	MUESTRA	ENSAYO SPT				DESCRIPCIÓN DE MATERIALES	COMPRESION TRIAXIAL UU			LIMITES DE ATTERBERG			GRANULO METRIA			SUCS	Litogénesis
		0-15	15-30	30-45	"N" SPT		C kg/m <sup>2</sup>	PHI °	Y g/cm <sup>3</sup>	W %	LL %	LP %	G	S	F		
5,25						Arcilla arenosa color café oscuro, con guijarros duros (<4 cm) y clastos de arcilla verde, manchada con oxidaciones ocre y negras de hierro y manganeso. La gravilla llega a componer hasta un 15% del depósito. Húmeda, plástica muy blanda	1,2		2,29	23							Relleno de cabecera de quebrada
5,50																	
5,75																	
6,00																	
6,25																	
6,50																	
6,75																	
7,00																	
7,25																	
7,50																	
7,75																	
8,00																	
8,25																	
8,50																	
8,75	Sh4																
9,00																	
9,25	S4	3	4	5	12												
9,50																	
9,75																	
10,00						MATERIAL DE RELLENO											

S = SPT

Sh = Shelby

### Anexo 13 Registros del sondeo Sta3B de exploración ejecutados durante el programa de exploraciones de campo. Tecnosuelos (2016).



PROF (m)	MUESTRA	ENSAYO SPT				DESCRIPCIÓN DE MATERIALES	COMPRESION TRIAXIAL UU			LIMITES DE ATTERBERG			GRANULO METRIA			SUCS	Litogénesis
		0-15	15-30	30-45	"N" SPT		C	PHI	Y	W	LL	LP	G	S	F		
							Kg/m <sup>2</sup>	°	g/cm <sup>3</sup>	(%)	(%)	(%)					
10,25						Arcilla arenosa color café oscuro, con guijarros duros (<4 cm) y clastos de arcilla verde, manchada con oxidaciones ocre y negras de hierro y manganeso. La gravilla llega a componer hasta un 15% del depósito. Húmeda, plástica muy blanda.											Relleno vial
10,50																	
10,75	S1	6	4	3	7												
11,00																	
11,25	Sh1																
11,50																	
11,75	Sh2																
12,00																	
12,25	S2	3	4	6	10						47	24	41	21	38	GC	
12,50																	
12,75	Sh3					MATERIAL DE RELLENO											RELLENO DE CABECERA DE QUEBRADA
13,00																	
13,25	S3	3	5	6	11												
13,50																	
13,75	Sh4																
14,00																	
14,25	S4	3	5	7	12												
14,50																	
14,75																	
15,00																	

S = SPT

Sh = Shelby

### Anexo 13 Registros del sondeo Sta3B de exploración ejecutados durante el programa de exploraciones de campo. Tecnosuelos (2016).



**Anexo 14 Registro fotográfico casa sin afecciones dentro de la zona afectada en la urbanización Trigales Altos.**



Anexo 14.1 Casa sin afecciones dentro de la zona afectada 03/2015, Google (2018).



Anexo 14.2 Casa sin afecciones dentro de la zona afectada 11/2016.





Anexo 14.3 Casa sin afecciones dentro de la zona afectada 06/2017.